



TUGAS AKHIR - TF 141581

**ANALISIS SENSITIVITAS SISTEM KENDALI
AKIBAT PERUBAHAN KOEFISIEN
HIDRODINAMIKA PADA KAPAL PERANG
KELAS SIGMA *EXTENDED***

**DESTY AJENG PAWESTRI
NRP. 2413 100 011**

**Dosen Pembimbing :
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 141581

***SENSITIVITY ANALYSIS OF CONTROL
SYSTEM DUE TO THE CHANGES OF
HYDRODYNAMIC COEFFICIENTS IN SIGMA
EXTENDED WAR SHIP CLASS***

***DESTY AJENG PAWESTRI
NRP. 2413 100 011***

***Supervisors :
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.***

***ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017***

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Desty Ajeng Pawestri
NRP : 2413100011
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Sensitivitas Sistem Kendali Akibat Perubahan Koefisien Hidrodinamika pada Kapal Perang Kelas SIGMA *Extended*” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Surabaya, 11 Januari 2017
Yang membuat pernyataan,



Desty Ajeng Pawestri
NRP. 2413100011

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS SENSITIVITAS SISTEM KENDALI AKIBAT
PERUBAHAN KOEFISIEN HIDRODINAMIKA PADA
KAPAL PERANG KELAS SIGMA *EXTENDED***

Oleh :
Desty Ajeng Pawestri
NRP. 2413 100 011

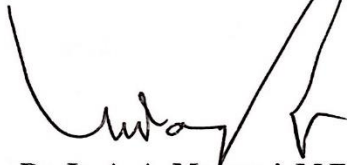
Surabaya, 11 Januari 2017

**Menyetujui,
Dosen Pembimbing I**



Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
NIPN. 196601161989032001

**Menyetujui,
Dosen Pembimbing II**



Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.
NIPN. 195808071984031001



**Mengetahui,
Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS**

Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 19780902 200312 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALISIS SENSITIVITAS SISTEM KENDALI AKIBAT
PERUBAHAN KOEFISIEN HIDRODINAMIKA PADA
KAPAL PERANG KELAS SIGMA *EXTENDED***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

DESTY AJENG PAWESTRI
NRP. 2413 100 011

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. (Pembimbing I)
2. Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng. (Pembimbing II)
3. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc. (Penguji I)
4. Ir. Matradji, M.Kom. (Penguji II)
5. Andi Rahmadiansah, S.T., M.T. (Penguji III)

SURABAYA
JANUARI, 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISIS SENSITIVITAS SISTEM KENDALI AKIBAT PERUBAHAN KOEFISIEN HIDRODINAMIKA PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA *EXTENDED*

Nama : Desty Ajeng Pawestri
NRP : 2413 100 011
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Dr. Ir. Aulia S. Aisjah, M.T.
2. Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

Abstrak

Dimensi kapal menentukan besarnya koefisien hidrodinamika. Performansi kestabilan kapal sangat bergantung pada koefisien hidrodinamika kapal. Performansi kestabilan kapal ditentukan oleh pengendali dan parameter model dinamika kapal. Tugas akhir ini melakukan analisis terhadap performansi kestabilan pengendali akibat perubahan dimensi panjang kapal. Perubahan dimensi kapal dilakukan dengan menambahkan panjang L_{pp} (*Length per pendicular*) dalam toleransi koefisien blok antara 0,4 sampai dengan 0,6. Model pengendali yang dirancang adalah PID dengan *tunning* terhadap *gain* pengendali menggunakan metode *Ziegler-Nichols*. Uji terhadap model dilakukan dengan metode *root locus* dan hasilnya menunjukkan bahwa sistem bersifat stabil. Uji terhadap pengendali dilakukan dengan *set point* sesuai standar IMO (*International Maritime Organization*) yaitu 20° dan 30° . Pengendalian PID yang telah dirancang didapatkan rentang nilai K_p , K_i , dan K_d dengan *set point heading* 20° yaitu 0,000274970 – 0,000238380; 0,000082597 – 0,000067669; 0,000402230 – 0,000384870. Rentang nilai K_p , K_i , dan K_d dengan *set point heading* 30° yaitu 0,00027505 – 0,00020104; 0,00008276 – 0,00003844; 0,00045293 – 0,0040142. Performansi sistem kendali dikatakan stabil karena nilai *maximum overshoot*nya sudah sesuai dengan standar.

Kata Kunci : Dimensi, KRI Diponegoro, pengendalian PID, performansi, *Ziegler-Nichols*

Halaman ini sengaja dikosongkan

SENSITIVITY ANALYSIS OF CONTROL SYSTEM DUE TO THE CHANGES OF HYDRODYNAMIC COEFFICIENTS IN SIGMA EXTENDED WAR SHIP CLASS

Name : Desty Ajeng Pawestri
NRP : 2413 100 011
Department : Engineering Physics FTI-ITS
Supervisors : 1. Prof. Dr. Ir. Aulia S. Aisjah, MT
2. Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng

Abstract

Dimension of ship is determined by hydrodynamics coefficient. The stability of performance depend on hydrodynamics coefficient. That is determined by controller and dinamic ship models parameters. This final project is analyze the control stability of performance caused by the change of dimension of ship. The change of dimension of ship by adding the Lpp (Length per pendicular) in block coefficient tolerace are 0,4 until 0,6. Control mode designed is PID control by tuning the control gain use Ziegler-Nichols method. The model test use root locus method and the result is stable. The control test by input set point that suitable with IMO (International Maritime Organization) is 20° and 30°. PID control that designed obtained ranges value of Kp, Ki, and Kd with heading set point 20° is yaitu 0,000274970 – 0,000238380; 0,000082597 – 0,000067669; 0,000402230 – 0,000384870. The value ranges of Kp, Ki, and Kd with heading set point 30° is 0,00027505 – 0,00020104; 0,00008276 – 0,00003844; 0,00045293 – 0,00401425864. The stability performance system is stable because maximum overshoot from plant coressponding with standar.

Keywords : *Dimension, KRI Diponegoro, PID control, performance, Ziegler-Nichols*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya Tugas Akhir beserta Laporan Tugas Akhir yang berjudul **ANALISIS SENSITIVITAS SISTEM KENDALI AKIBAT PERUBAHAN KOEFISIEN HIDRODINAMIKA PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA *EXTENDED***.

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian Tugas Akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. dan Bapak Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Bapak Totok Ruki Biyanto S.T., M.T., Ph.D. selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Instrumensi yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta kemudahan perizinan.
4. Bapak Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc. selaku dosen wali penulis yang telah membimbing selama perkuliahan.
5. Kedua orang tua (Bapak Sariyanto dan Ibu Sri Karyati) serta saudara (Bagas Dwi Putra Ramadian). Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
6. Seluruh teman Tugas Akhir (Mima Aulia dan Farida Ambarwati), terima kasih untuk semuanya.
7. Seluruh dosen, karyawan, dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Selain itu juga semoga dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan Tugas Akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 11 Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul	i
<i>Title Page</i>	iii
Lembar Pengesahan I	iv
Lembar Pengesahan II	vii
Abstrak	ix
<i>Abstract</i>	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR NOTASI	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	4
BAB II TEORI PENUNJANG.....	5
2.1 Manuver Kapal.....	5
2.2 Model Dinamika Kapal	6
2.2.1 Bentuk Normalisasi	10
2.3 Pemodelan Dinamika <i>Rudder</i>	12
2.4 Model Gangguan pada Kapal	12
2.5 Koefisien Hidrodinamika Kapal	13
2.5.1 Koefisien Blok (C_B)	13
2.5.2 Panjang Kapal (L_{pp}).....	13
2.5.3 Lebar Kapal (B).....	13
2.5.4 Tinggi Kapal (H)	14
2.5.5 Sarat Kapal (T).....	14
2.5.6 <i>Displacement</i>	14
2.6 Sistem Pengendalian	14
2.6.1 Sistem Pengendalian Umpan Balik	15
2.6.2 Kestabilan Sistem Pengendalian	16

2.6.3 Perhitungan Parameter Kendali dengan Metode <i>Ziegler-Nichols</i>	19
2.7 Standar <i>Maneuverability</i>	20
2.8 Indeks Stabilitas <i>Yaw</i>	22
2.9 <i>Root-Locus</i>	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Studi Literatur	26
3.2 Pengumpulan Data Kapal Perang Kelas SIGMA.....	26
3.3 Pemodelan Dinamika Kapal.....	27
3.3.1 Pemodelan Dinamika Kapal Perang Kelas SIGMA <i>Extended</i> dengan Variasi Dimensi Kapal	27
3.3.2 Pemodelan <i>Rudder</i>	33
3.3.3 Pemodelan Gangguan Gelombang	33
3.4 Perancangan Sistem Kendali pada Kapal Perang Kelas SIGMA <i>Extended</i> dengan Variasi Dimensi Kapal Menggunakan Kendali PID	34
3.5 Simulasi Hasil Modifikasi Variasi Dimensi Kapal	36
3.5.1 Uji <i>Root-Locus</i>	36
3.5.2 Uji Indeks Stabilitas <i>Yaw</i>	36
3.5.3 Uji <i>Open Loop</i> Sistem Kapal	36
3.6 Analisis Hasil Simulasi	37
3.7 Penyusunan Laporan	37
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Analisis Uji <i>Root-Locus</i>	41
4.2 Analisis Uji <i>Open Loop</i>	45
4.3 Analisis Uji Indeks Stabilitas	46
4.4 Analisis Uji <i>Turning</i>	47
4.5 Analisis Perubahan Koefisien Hidrodinamika Kapal Akibat Perubahan Dimensi Panjang Kapal (L_{pp}).....	59
4.6 Analisis ΔG Terhadap Nilai K_p , K_i , dan K_d	66
BAB V PENUTUP	71
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA.....	73
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Derajat Kebebasan Kapal (Fossen, 1994)	6
Gambar 2. 2	Variabel yang Mendeskripsikan Pergerakan Kapal secara Horizontal (Fossen, 1994)	8
Gambar 2. 3	Diagram Blok Sistem Pengendalian Tertutup (Ogata, 2009).....	15
Gambar 2. 4	Diagram Blok Kendali PID (Hespana, 2009)	17
Gambar 2. 5	Diagram Blok Kendali PID <i>Ziegler-Nichols</i> (Lewis, 1992)	18
Gambar 2. 6	Kurva Respon <i>Step</i> (Lewis, 1992)	19
Gambar 3. 1	Diagram Alur Pelaksanaan Penelitian Tugas Akhir	25
Gambar 3. 2	Diagram Blok Sistem Pengendalian Manuver Kapal Perang KRI Diponegoro Kelas <i>SIGMA Extended</i>	34
Gambar 3. 3	Blok Diagram <i>Simulink</i> PID Kapal Perang Kelas <i>SIGMA KRI Diponegoro Extended</i>	35
Gambar 3. 4	Uji <i>Open Loop</i> Kapal Perang Kelas Sigma KRI Diponegoro <i>Extended</i>	36
Gambar 3. 5	Diagram Blok Uji <i>Turning</i> Tanpa Gangguan.....	38
Gambar 3. 6	Diagram Blok Uji <i>Turning</i> dengan Gangguan.....	39
Gambar 4. 1	Diagram <i>Root-Locus Open-Loop</i> Kapal KRI Diponegoro Kelas <i>SIGMA Extended</i> dengan Panjang 106 Meter	41
Gambar 4. 2	Pergeseran Diagram <i>Root-Locus Open Loop</i> Kapal KRI Diponegoro Kelas <i>SIGMA Extended</i> dengan Panjang 101% sampai 110%	43
Gambar 4. 3	Uji <i>Open Loop</i> Sudut <i>Heading</i> 20°	45
Gambar 4. 4	Uji <i>Open Loop</i> Sudut <i>Heading</i> 30°	46
Gambar 4. 5	Uji <i>Turning</i> dengan Sudut <i>Heading</i> 20° (Tanpa Gangguan)	47
Gambar 4. 6	Uji <i>Turning</i> dengan Sudut <i>Heading</i> 20° (Ada Gangguan)	48
Gambar 4. 7	Uji <i>Turning</i> Panjang 100% sampai Panjang 110% dengan Sudut <i>Heading</i> 20° (Tanpa Gangguan)	49

Gambar 4. 8	Uji <i>Turning</i> Panjang 100% sampai Panjang 110% dengan Sudut <i>Heading</i> 20° (Ada Gangguan)	51
Gambar 4. 9	Uji <i>Turning</i> dengan Sudut <i>Heading</i> 30° (Tanpa Gangguan)	53
Gambar 4. 10	Uji <i>Turning</i> dengan Sudut <i>Heading</i> 30° (Ada Gangguan)	54
Gambar 4. 11	Uji <i>Turning</i> Panjang 100% sampai Panjang 110% dengan Sudut <i>Heading</i> 30° (Tanpa Gangguan)	55
Gambar 4. 12	Uji <i>Turning</i> Panjang 100% sampai Panjang 110% dengan Sudut <i>Heading</i> 30° (Ada Gangguan)	57
Gambar 4. 13	Grafik Perubahan Koefisien Blok	59
Gambar 4. 14	Grafik Perubahan Y'_v	60
Gambar 4. 15	Grafik Perubahan Y'_r	60
Gambar 4. 16	Grafik Perubahan N'_v	61
Gambar 4. 17	Grafik Perubahan N'_r	61
Gambar 4. 18	Grafik Perubahan Y'_v	62
Gambar 4. 19	Grafik Perubahan Y'_r	62
Gambar 4. 20	Grafik Perubahan N'_v	63
Gambar 4. 21	Grafik Perubahan N'_r	63
Gambar 4. 22	Grafik Perubahan Y_δ	64
Gambar 4. 23	Grafik Perubahan N_δ	64
Gambar 4. 24	Grafik Perubahan I_r'	65
Gambar 4. 25	Grafik Perubahan I_z'	65
Gambar 4. 26	Perubahan Nilai Kp, Ki, dan Kd dengan Sudut <i>Heading</i> 20°	68
Gambar 4. 27	Perubahan Nilai Kp, Ki, dan Kd dengan Sudut <i>Heading</i> 20o	70

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Derajat Kebebasan Kapal (Fossen, 2002).....	5
Tabel 2. 2 Pelinearan Variabel Menggunakan <i>Prime System</i> (Fossen, 1994)	11
Tabel 2. 3 Parameter Kp, Ti dan Td (Lewis, 1992)	19
Tabel 2. 4 Rumus <i>Ziegler-Nichols</i> (Lewis, 1992)	20
Tabel 2. 5 Standar Manuverabilitas Kapal oleh IMO (Resolution MSC, 2002)	21
Tabel 3. 1 Spesifikasi Kapal Perang KRI Diponegoro Kelas SIGMA <i>Extended</i> (Firdianda, Aisjah, & Masroeri, 2013).....	27
Tabel 3. 2 Koefisien Hidrodinamika Kapal Perang Kelas SIGMA KRI Diponegoro <i>Extended</i>	27
Tabel 3. 3 Nilai Koefisien Blok Akibat Perubahan Panjang Kapal (L_{pp})	30
Tabel 4. 1 Nilai Akar-akar Panjang Kapal 100% sampai Panjang 110%.....	42
Tabel 4. 2 Nilai Kp, Ki, dan Kd dengan Sudut <i>Heading</i> 20°	67
Tabel 4. 3 Selisih Nilai Kp, Ki, dan Kd dengan Sudut <i>Heading</i> 20°.....	67
Tabel 4. 4 Nilai Kp, Ki, dan Kd dengan Sudut <i>Heading</i> 30°	69
Tabel 4. 5 Selisih Nilai Kp, Ki, dan Kd dengan Sudut <i>Heading</i> 30°	69

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR NOTASI

X	=	gaya dan momen pada arah-x
Y	=	gaya dan momen pada arah-y
Z	=	gaya dan momen pada arah-z
K	=	gaya dan momen pada sumbu-x
M	=	gaya dan momen pada sumbu-y
N	=	gaya dan momen pada sumbu-z
u	=	kecepatan linier dan anguler pada arah-x
v	=	kecepatan linier dan anguler pada arah-y
w	=	kecepatan linier dan anguler pada arah-z
q	=	kecepatan linier dan anguler pada sumbu-x
p	=	kecepatan linier dan anguler pada sumbu-y
r	=	kecepatan linier dan anguler pada sumbu-z
x	=	posisi dan sudut euler pada arah-x
y	=	posisi dan sudut euler pada arah-y
z	=	posisi dan sudut euler pada arah-z
θ	=	posisi dan sudut euler pada sumbu-x
ϕ	=	posisi dan sudut euler pada sumbu-y
ψ	=	posisi dan sudut euler pada sumbu-z
M	=	matriks inersia
C	=	matriks dari <i>coriolis</i> dan disebut gaya sentripetal
D	=	matriks redaman
$g(\eta)$	=	vektor dari gaya dan momen gravitasi
τ	=	vektor dari input kendali
v	=	vektor kecepatan angular dan linear
\dot{v}	=	vektor percepatan <i>sway</i>
\dot{r}	=	Vektor percepatan <i>yaw</i>
$Y'_{\dot{v}}$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap \dot{v} non dimensi
$Y'_{\dot{r}}$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap \dot{r} non dimensi
$N'_{\dot{v}}$	=	turunan momen arah <i>yaw</i> terhadap \dot{v} non dimensi
$N'_{\dot{r}}$	=	turunan momen arah <i>yaw</i> terhadap \dot{r} non dimensi
$Y_{\dot{v}}$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap \dot{v} (Ndet ² /m)
$Y_{\dot{r}}$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap \dot{r} (Ndet ² /m)
$N_{\dot{v}}$	=	turunan momen arah <i>yaw</i> terhadap \dot{v} (Ndet ² /m)

$N_{\dot{r}}$	=	turunan momen arah <i>yaw</i> terhadap \dot{r} (Ndet ² /m)
δ_R	=	sudut <i>rudder</i>
m	=	massa kapal (kg)
r	=	notasi putaran kapal
x_G	=	pusat massa
Y_{δ}	=	gaya dan momen <i>rudder</i> pada arah-y
N_{δ}	=	gaya dan momen <i>rudder</i> pada sumbu-z
I_z	=	momen inersia (kg.m ²)
I_r	=	momen inersia (kg.m ²)
δ_c	=	<i>command rudder</i>
δ_a	=	aktuator <i>rudder</i>
k	=	penguat <i>rudder</i>
σ	=	<i>time constant</i>
w	=	<i>zero-mean Gaussian white noise process</i>
σ_m	=	nilai konstan dari intensitas gelombang
h	=	tinggi gelombang (m)
ξ	=	koefisien rasio peredam
ω_0	=	frekuensi gelombang
L	=	panjang (m)
B	=	lebar (m)
T	=	sarat kapal (m)
C_B	=	<i>block coefficient</i>
∇	=	<i>displacement</i> (ton)
ρ	=	massa jenis air
K_p	=	konstanta proporsional
K_i	=	konstanta integral
K_d	=	konstanta derivatif
$m(t)$	=	keluaran sistem pengendali
$e(t)$	=	sinyal kesalahan kendali
T_i	=	waktu integral
T_d	=	waktu derivatif
K_c	=	<i>gain</i> pengendali
T_c	=	waktu pengendali
C'	=	indeks stabilitas <i>yaw</i>
p_n	=	<i>pole</i>
z_n	=	<i>zero</i>

U	=	Kecepatan (knot atau m/s)
m'	=	massa gravitasi non dimensi
$X_{G'}$	=	spesifikasi gravitasi non dimensi
A_{δ}	=	luasan <i>rudder</i> (m ²)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia disebut sebagai negara maritim, karena wilayah perairannya lebih luas daripada wilayah daratannya yaitu 2/3 wilayahnya berupa perairan. Wilayah perairan Indonesia berada di antara dan di sekitar pulau-pulaunya, dengan luas kurang lebih 5.193.250 km² terletak pada posisi silang antara dua benua yaitu Asia dan Australia, dan antara dua samudra yaitu Hindia dan Pasifik. Perairan Indonesia terdiri dari luas perairan kepulauan dan laut teritorial sebesar 3,1 juta km² dan luas Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) sebesar 2,7 juta km², serta memiliki garis pantai mencapai 80.791 km (Iu zou, 2013). Indonesia juga berbatasan langsung dengan 10 negara tetangga, baik yang bersebelahan maupun yang terpisah oleh lautan. 10 negara tetangga tersebut yaitu India, Thailand, Papua Nugini, Vietnam, Republik Demokratik Timor Leste (RDTL), Malaysia, Singapura, Filipina, Australia, dan Republik Palau. Kondisi geografis yang seperti itu menyebabkan Indonesia memiliki potensi yang sangat besar dalam mengembangkan wilayah perairannya. Potensi terbesar adalah sumber daya yang ada didalamnya, sedangkan kelemahannya adalah masalah perhubungan antar pulau-pulau serta masalah keamanan didaerah perbatasan terutama perbatasan laut, maka pengembangan potensi wilayah perairan sangat perlu diikuti pula dengan peningkatan sistem keamanan wilayah perairan yang memadai untuk menghindari serangan atau ancaman dari negara lain yang berusaha mengganggu kedaulatan NKRI (Negara Kesatuan Republik Indonesia) (D., 2014). Salah satu cara meningkatkan keamanan perairan wilayah Indonesia yaitu dengan cara mengembangkan sistem *guidance* untuk kapal Perang Kelas SIGMA KRI Diponegoro. Kapal perang yang sebelumnya hanya memiliki panjang kapal 90.71 meter, namun sekarang kapal Perang Kelas SIGMA KRI Diponegoro telah mengalami perubahan panjang yaitu menjadi 106 meter. Perubahan panjang kapal Perang Kelas SIGMA KRI Diponegoro didasarkan karena adanya tuntutan

dari dari tim konsorsium kapal perang untuk melakukan *redesain* Kapal Perang Kelas SIGMA KRI Diponegoro. Tugas akhir ini peneliti melakukan perpanjangan kapal untuk meningkatkan sistem keamanan wilayah perairan NKRI. Perubahan panjang kapal akan mempengaruhi performansi kapal akibat dari perubahan koefisien hidrodinamika. Kapal memiliki performansi yang baik, maka kapal juga akan memiliki tingkat sensitivitas yang baik pula. Perubahan koefisien hidrodinamika untuk mencari performansi yang baik dapat dikendalikan dengan sistem kendali. Kemampuan gerak kapal sangat berpengaruh terhadap kendali kapal. Sistem kendali yang dapat digunakan yaitu kendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*). Sistem kendali PID dipilih karena pengendalian PID akan mengantisipasi terjadinya *error* kedepan dan menerapkan aksi pengendalian yang proporsional terhadap perubahan laju *error*. Tugas akhir ini menerapkan sistem kendali PID sebagai dasar penghitungan performansi kapal Perang Kelas SIGMA *Extended* yang akan memberikan koefisien hidronamika baru setelah mendapatkan modifikasi yang sesuai agar performansi kapal Perang Kelas SIGMA *Extended* mendapatkan hasil yang baik.

1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang diatas, permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini adalah.

1. Bagaimana pengaruh perubahan koefisien hidrodinamika terhadap kestabilan sistem kendali kapal ?
2. Berapa toleransi panjang kapal perang agar dapat mempertahankan kestabilan sistem kendali kapal ?
3. Bagaimana performansi sistem kendali akibat perubahan koefisien hidrodinamika ?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan ruang lingkup dari tugas akhir ini adalah.

1. Dalam obyek pengujian menggunakan kapal Perang Kelas SIGMA *Extended* yaitu kapal Perang KRI Diponegoro.
2. Panjang kapal (*parallel middle body*) sebagai parameter yang akan diubah-ubah untuk menentukan pengaruh koefisien hidrodinamika pada performansi kapal Perang Kelas SIGMA *Extended*.
3. Metode yang digunakan untuk perancangan sistem kendali kapal dengan menggunakan kendali PID.
4. Variabel yang dikendalikan adalah 2 derajat kebebasan (*degree of freedom*) yaitu gerak *sway* dan *yaw*, dengan asumsi bahwa secara eksperimen gerak *surge*, *pitch*, *roll*, dan *heave* tidak berpengaruh pada *maneuvering* kapal.
5. Performansi yang dimaksud pada penelitian ini adalah sensitivitas sistem kendali kapal.
6. Penelitian dilakukan dengan cara simulasi menggunakan *software* MATLAB R2009a.
7. Model dinamika kapal menggunakan bentuk fungsi transfer dengan metode Nomoto.
8. Gangguan pada sistem yaitu gelombang tipe *sea state 7* atau *high water* dengan tinggi gelombang 6 meter sampai dengan 9 meter.

1.4 Tujuan

Berdasarkan pemaparan latar belakang dan permasalahan maka tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah.

1. Mendapatkan hasil analisis kestabilan sistem kendali akibat perubahan koefisien hidrodinamika.
2. Mendapatkan toleransi panjang kapal pada kondisi kestabilan sistem.
3. Mendapatkan performansi sistem kendali akibat perubahan koefisien hidrodinamika.

1.5 Manfaat

Berdasarkan tujuan diatas maka manfaat dari tugas akhir ini adalah mampu memberikan rancangan kapal perang yang mempunyai dimensi panjang kapal maksimal dengan sistem kendali dalam keadaan stabil.

BAB II TEORI PENUNJANG

2.1 Manuver Kapal

Secara umum, ada enam macam gerakan yang dialami sebuah kapal ketika melaju di lautan, yaitu *yaw*, *heave*, *surge*, *sway*, *roll*, dan *pitch*. Gerakan-gerakan ini disebut juga 6 gerak derajat kebebasan yang akan dijelaskan melalui Tabel 2.1 dan Gambar 2.1.

Tabel 2. 1 Derajat Kebebasan Kapal (Fossen, 2002)

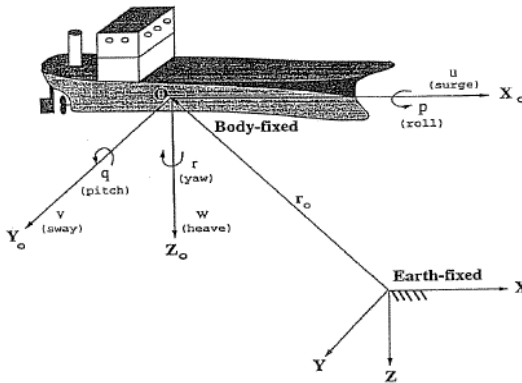
DOF	Gerakan	Gaya dan Momen	Kecepatan Linear dan Angular	Posisi dan Sudut Euler
1	Gerak pada arah-x (<i>surge</i>)	X	u	x
2	Gerak pada arah-y (<i>sway</i>)	Y	v	y
3	Gerak pada arah-z (<i>heave</i>)	Z	w	z
4	Rotasi pada sumbu-x (<i>roll</i>)	K	q	θ
5	Rotasi pada sumbu-y (<i>pitch</i>)	M	p	ϕ
6	Rotasi pada sumbu-z (<i>yaw</i>)	N	r	ψ

Bentuk umum persamaan gerakan 6 derajat kebebasan dinyatakan dalam bentuk :

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (2. 1)$$

dimana :

- M = matriks inersia
- C (v) = matriks dari *coriolis* dan disebut gaya sentripetal
- D (v) = matriks redaman
- $g(\eta)$ = vektor dari gaya dan momen gravitasi
- τ = vektor dari input kendali
- v = vektor kecepatan angular dan linear, $\mathbf{v} = [u, v, r]^T$



Gambar 2. 1 Derajat Kebebasan Kapal (Fossen, 1994)

2.2 Model Dinamika Kapal

Model dinamika kapal merupakan suatu hasil dari ilmu statika dan dinamika. Ilmu statika digunakan saat kapal mempertahankan posisinya dan bergerak dengan kecepatan konstan dan dinamika saat kapal melakukan akselerasi. Model matematika ini diawali dengan penemuan Archimedes terhadap gerakan hidrostatik yang menjadi dasar statika pada suatu kendaraan laut. Secara dinamika dirumuskan oleh Newton mengenai dinamika gerak yang terbagi menjadi kinematika dan kinetika. Model dinamik kapal dirumuskan sebagai suatu *rigid body* dengan 6 derajat kebebasan. Derajat kebebasan kapal ini terdiri dari 3 derajat kebebasan terhadap sumbu x, y, z, dan 3 derajat kebebasan lainnya mengacu kepada arah rotasi dan orientasi dari kapal. Keenam derajat kebebasan dari kapal laut biasa disebut sebagai : *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, *yaw*. Derajat kebebasan ini juga biasa disebut sebagai komponen gerak (Fossen, 1994).

Persamaan gerakan dalam 6 derajat kebebasan dari benda kaku dapat ditunjukkan pada persamaan 2.2 sampai persamaan 2.7.

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X \quad (2. 2)$$

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = Y \quad (2. 3)$$

$$m[\dot{w} - wq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] = Z \quad (2. 4)$$

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K \quad (2. 5)$$

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M \quad (2.6)$$

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{q} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N \quad (2.7)$$

Penurunan persamaan kecepatan dan kemudi gerakan kapal didasarkan pada 2 asumsi yaitu.

- i. Distribusi homogen dan bidang xz simetris ($I_{xy} = I_{yz} = 0$)
- ii. Mode *heave*, *roll*, dan *pitch* dapat diabaikan ($w = p = q = \dot{w} = \dot{p} = \dot{q} = 0$)

Kedua asumsi tersebut diaplikasikan pada persamaan 2.2 sampai persamaan 2.7, sehingga diperoleh persamaan kecepatan kapal dalam arah *surge* (X) dan persamaan kemudi kapal dalam arah *sway* dan *yaw* (Y dan N) yang ditunjukkan pada persamaan 2.8 sampai persamaan 2.10.

$$\text{Surge} : m(\dot{u} - vr - x_G \dot{r}^2) = X \quad (2.8)$$

$$\text{Sway} : m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y \quad (2.9)$$

$$\text{Yaw} : I_z \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) = N \quad (2.10)$$

Berdasarkan persamaan linear dinamika sistem kemudi kapal dari persamaan 2.8 sampai persamaan 2.9. Davidson dan Schiff (1946) berdasarkan teori linear mengusulkan bahwa gaya dan momen *hydrodynamic* dapat dimodelkan seperti pada persamaan 2.11 dan persamaan 2.12.

$$Y = Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_{\delta} \delta_R \quad (2.11)$$

$$N = N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_v v + N_r r + N_{\delta} \delta_R \quad (2.12)$$

Persamaan gerakan akan berubah menjadi

$$M \dot{v} + N(u_0)v = b \delta_R \quad (2.13)$$

keterangan :

$$v = [v, r]^T \text{ adalah state vector}$$

$$\delta_R = \text{sudut rudder}$$

$$N(u_0) = C(u_0) + D$$

Matriks inersia, redaman, momen dan gaya *rudder* pada persamaan 2.13 ditunjukkan pada persamaan 2.14 sampai 2.16.

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$N(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ -N_v & mx_G u_0 - N_r \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$b = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Model dinamika kapal didapatkan dari pendekatan yang dilakukan oleh Nomoto (1957) sebagai bentuk matematis orde 2. Persamaan (2.17) merupakan fungsi transfer Nomoto :

$$\frac{\psi}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1 + T_3 s)}{s(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} \quad (2.17)$$

Parameter – parameter dari fungsi transfer persamaan (2.17) diperoleh dari :

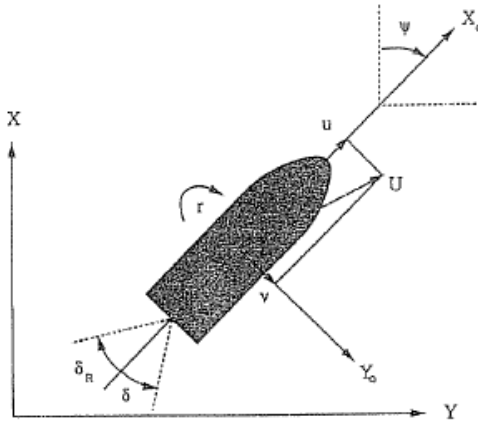
$$T_1 T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)} \quad (2.18)$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det(N)} \quad (2.19)$$

$$K_R = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)} \quad (2.20)$$

$$K_R T_3 = \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{\det(N)} \quad (2.21)$$

Elemen m_{ij} , n_{ij} dan b_i ($i = 1,2$ dan $j = 1,2$) didapatkan dari matriks pada persamaan 2.14 sampai dengan 2.16.



Gambar 2. 2 Variabel yang Mendeskripsikan Pergerakan Kapal secara Horizontal (Fossen, 1994)

Determinan dari matriks inersia dan redaman dihitung menggunakan persamaan 2.22 dan persamaan 2.23.

$$\det(N) = Y_v(N_r - mx_G u) - N_v(Y_r - mu) \quad (2.22)$$

$$\det(M) = (m - Y_v)(I_z - N_r) - (mx_G - N_v)(mx_G - Y_r) \quad (2.23)$$

keterangan :

$$n_{11} = -Y_v$$

$$n_{21} = -N_v$$

$$b_1 = \frac{(I_z - N_r)Y_\delta - (mx_G - Y_r)N_\delta}{\det M} \quad (2.24)$$

$$b_2 = \frac{(m - Y_v)N_\delta - (mx_G - N_v)Y_\delta}{\det M} \quad (2.25)$$

Matriks M dan matriks N pada persamaan 2.14 sampai dengan persamaan 2.16 mengandung parameter hidrodinamika kapal, dimana m = massa kapal, Y'_v = turunan gaya arah *sway* terhadap \dot{v} , Y'_r = turunan gaya *yaw* terhadap \dot{r} , N'_v = turunan momen *sway* terhadap \dot{v} , N'_r = turunan momen *yaw* terhadap \dot{r} , Y'_v = turunan gaya arah *sway* terhadap v , Y'_r = turunan gaya arah *yaw* terhadap r , N'_v = turunan momen *sway* terhadap v , N'_r = turunan momen *yaw* terhadap r , x_G = pusat massa.

Perubahan koefisien tak berdimensi menjadi berdimensi dengan menggunakan pendekatan pada aturan Comstock (1967) dan Newman (1977), sehingga dapat diperkirakan koefisien hidrodinamik yang dinyatakan dalam persamaan 2.26 sampai dengan persamaan 2.36 (Bertram, 2000). Notasi (‘) aksen menggantikan bentuk variabel non dimensi.

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.16 \frac{C_B B}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L} \right)^2 \quad (2.26)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = 0.67 \left(\frac{B}{L} \right) - 0.0033 \left(\frac{B}{T} \right)^2 \quad (2.27)$$

$$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = 1.1 \left(\frac{B}{L} \right) - 0.041 \left(\frac{B}{T} \right) \quad (2.28)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0.017 \frac{C_B B}{T} - 0.33 \left(\frac{B}{L} \right) \quad (2.29)$$

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.4 \frac{C_B B}{T} \quad (2.30)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2.2 \left(\frac{B}{L} \right) - 0.08 \left(\frac{B}{T} \right) \quad (2.31)$$

$$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2.4 \left(\frac{T}{L} \right) \quad (2.32)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0.039 \frac{B}{T} - 0.56 \left(\frac{B}{L} \right) \quad (2.33)$$

Besar nilai momen inersia I_z (kg.m²) dinyatakan dalam persamaan (2.34).

$$I_z = mx_G^2 + I_r \quad (2.34)$$

keterangan :

m = massa kapal (kg)

r = notasi putaran kapal

$I_r = mr^2$ dimana, $0,15L < r < 0,3L$

$x_p = x_g \pm 0,1L$

Besar gaya dan momen yang diakibatkan *rudder* dinyatakan dalam bentuk.

$$Y_\delta = \rho \frac{\pi A_\delta}{4 LT} \quad (2.35)$$

$$N_\delta = -\frac{1}{2} Y_\delta \quad (2.36)$$

Koefisien hidrodinamika pada persamaan 2.35 dan 2.36 masih berupa koefisien tak berdimensi, untuk mengubah menjadi berdimensi dapat dilakukan perhitungan seperti Tabel 2.2. Perubahan koefisien tak berdimensi menjadi berdimensi disesuaikan dengan fungsi tiap koefisien.

2.2.1 Bentuk Normalisasi

Persamaan dinamika kapal pada persamaan 2.26 sampai dengan 2.36 merupakan persamaan dalam bentuk non dimensi.

Persamaan non dimensi dapat diubah dengan menggunakan *Prime-System* SNAME (1950), sehingga menjadi berdimensi.

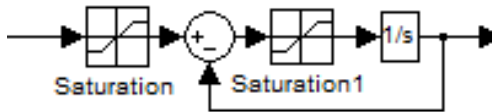
Tabel 2. 2 Pelinearan Variabel Menggunakan *Prime System* (Fossen, 1994)

<i>Unit</i>	<i>Prime-System I</i>
Panjang (m)	L
Massa (kg)	$\frac{\rho}{2} L^3$
Momen Inersia (kg.m ²)	$\frac{\rho}{2} L^5$
Waktu (s)	$\frac{L}{U}$
Area Referensi (m ²)	L^2
Posisi (m)	L
Sudut	1
Kecepatan Linear	U
Kecepatan Angular	$\frac{U}{L}$
Percepatan Linear	$\frac{U^2}{L}$
Percepatan Angular	$\frac{U^2}{L^2}$
Gaya	$\frac{\rho}{2} U^2 L^2$
Momen	$\frac{\rho}{2} U^2 L^3$

Normalisasi diperlukan karena koefisien hidrodinamika kapal yang digunakan saat pemodelan merupakan kapal dengan ukuran yang lebih kecil (*prototype*), agar dapat digunakan pada kapal berukuran lebih besar diperlukan normalisasi koefisien hidrodinamika (Fossen, 1994).

2.3 Pemodelan Dinamika *Rudder*

Rudder merupakan kemudi pada kapal yang berfungsi untuk menentukan arah kapal sesuai dengan perintah pengendali. Keluaran dari pengendali PID berupa *command rudder* (δ_c) yang diubah menjadi aktuatur *rudder* (δ_a). Kemudi yang sering digunakan pada kapal adalah tipe Van Amorengen. *Rudder* memiliki spesifikasi sudut sebesar -35° sampai 35° dengan laju kerja *rudder* antara $2,3^\circ/\text{s}$ – $7^\circ/\text{s}$. Gambar 2.2 merupakan diagram blok untuk mensimulasikan dinamika dari *rudder* Van Amerongen (Fossen, 1994).



Gambar 2.2 Diagram *control loop rudder* (Fossen, 1994)

Secara matematis, diagram blok pada Gambar 2.2 dapat didekati dengan persamaan 2.37.

$$\delta = \frac{k}{\sigma s + 1} \quad (2.37)$$

dengan nilai k adalah penguat *rudder* ($\Delta O / \Delta I$) dan σ adalah *time constant*.

2.4 Model Gangguan pada Kapal

Model dinamika kapal dapat dipengaruhi oleh beberapa gangguan. Gangguan ini antara lain angin, gelombang dan arus. Model gelombang dapat ditunjukkan pada persamaan 2.38 (Fossen, 1996).

$$y(s) = h(s)w(s) \quad (2.38)$$

dengan $w(s)$ adalah *zero-mean Gaussian white noise process*.

Pemodelan dari fungsi transfer gelombang dilakukan berdasarkan pendekatan dari persamaan Later Saelid, Jenssen dan Balchen (1983). Persamaan ini memperbaiki persamaan model linear gelombang sebelumnya yaitu dengan menambahkan pengaruh damping pada dinamika posisi kapal agar diperoleh

spektrum kapal yang lebih baik. Persamaan Later Saelid ditunjukkan pada persamaan 2.39.

$$h(s) = \frac{K\omega s}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2.39)$$

Nilai koefisien *gain* pada persamaan 2.39 adalah konstan, sehingga nilai $K\omega$ adalah.

$$K\omega = 2\xi\omega_0\sigma \quad (2.40)$$

σ_m menyatakan nilai konstan dari intensitas gelombang, sedangkan ξ adalah koefisien rasio peredam dan ω_0 adalah frekuensi gelombang.

2.5 Koefisien Hidrodinamika Kapal

2.5.1 Koefisien Blok (C_B)

Koefisien blok (C_B) adalah perbandingan antara *volume* badan kapal yang tercelup dalam air dibandingkan *volume* blok. Koefisien blok (C_B) yang rendah umumnya ditemukan pada kapal-kapal cepat, sedangkan nilai C_B yang besar dijumpai di kapal-kapal tangker pengangkut muatan minyak mentah. Untuk mencari koefisien blok dengan persamaan 2.41.

$$C_B = \frac{\nabla}{LxBxT} \quad (2.41)$$

dimana :

L = panjang (meter)

B = lebar (meter)

T = sarat kapal (meter)

C_B = *block coefficient*

∇ = *displacement* (ton)

2.5.2 Panjang Kapal (L_{pp})

Panjang kapal (L_{pp}) atau *Length per pendicular* memiliki pengaruh pada tahanan dan *maneuverability*. Panjang kapal lebih diperbesar maka tahanan kapal dan *maneuverability* kecil, sedangkan jika ukuran panjang kapalnya lebih kecil maka tahanan kapal, kecepatan kapal, dan *maneuverability* besar.

2.5.3 Lebar Kapal (B)

Lebar kapal (B) atau *Breath* memiliki pengaruh pada tinggi *metacenter* kapal. Penambahan lebar kapal biasanya digunakan untuk penambahan *volume* ruangan pada badan kapal dan juga

memiliki efek berkurangnya kemampuan dalam penggunaan fasilitas terusan, dok, dan galangan.

2.5.4 Tinggi Kapal (H)

Tinggi kapal (H) atau *Depth* memiliki pengaruh pada tinggi titik berat kapal (*center of gravity*). Penambahan ketinggian kapal pada umumnya akan menyebabkan kenaikan nilai titik berat kapal, sedangkan nilai *metacenter* kapal akan berkurang.

2.5.5 Sarat Kapal (T)

Sarat kapal (T) atau *Draught* memberikan pengaruh pengaruh pada tinggi *center of bouancy* (K_B). *Displacement*, panjang, dan lebar yang tetap, dan penambahan nilai sarat umumnya akan menyebabkan naiknya nilai K_B .

2.5.6 *Displacement*

Displacement merupakan jumlah air yang dipindahkan oleh bagian kapal yang tenggelam dalam. Koefisien hidrodinamika ini dikenal juga dengan *mass displacement* yang merupakan satuan gaya (ton). Secara matematis *displacement* ditunjukkan pada persamaan 2.42.

$$\Delta(\text{ton}) = L \times B \times T \times C_B \times \rho \quad (2.42)$$

dimana :

L = panjang (meter)

B = lebar (meter)

T = sarat kapal (meter)

C_B = *block coefficient*

∇ = *displacement* (ton)

ρ = massa jenis air ($\rho_{\text{air laut}} = 1025 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{air tawar}} = 1000 \text{ kg/m}^3$)

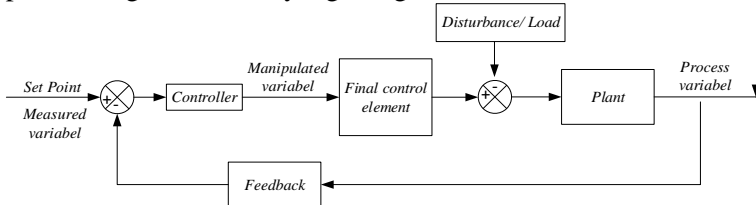
2.6 Sistem Pengendalian

Sistem pengendalian adalah gabungan dari kerja suatu komponen yang digunakan untuk mempertahankan variabel yang dikendalikan pada suatu nilai tertentu sehingga sistem dapat dikatakan stabil. Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi menyebabkan suatu sistem pengendalian memakai pengendalian otomatis. Suatu sistem linear (*Linear Time Invariant*) dikatakan stabil jika respon natural sistem mendekati nol pada waktu

mendekati tak terhingga. Sistem linear dikatakan tidak stabil jika respon natural meningkat tanpa batas jika waktu mendekati tak terhingga.

2.6.1 Sistem Pengendalian Umpan Balik

Sistem pengendalian umpan balik merupakan sistem *loop* tertutup yang berfungsi menjaga nilai keluaran sistem sesuai dengan nilai yang dikehendaki dengan atau tanpa adanya gangguan. Cara kerja sistem umpan balik dengan mengurangi kesalahan sampai mendekati nilai yang telah ditentukan. Kesalahan yang dimaksud adalah selisih antara keluaran suatu unit operasi dengan keluaran yang diinginkan.



Gambar 2. 3 Diagram Blok Sistem Pengendalian Tertutup
(Ogata, 2009)

Uraian dari diagram blok pada Gambar 2.3 adalah (Ogata, 2009).

1. *Controller* berfungsi untuk mendeteksi sinyal kesalahan dari selisih keluaran sistem dengan *set point* serta dilengkapi penguat sinyal yang berfungsi sebagai pengkondisian sinyal untuk masuk ke aktuator.
2. *Actuator* adalah alat penggerak yang menerima sinyal dari aktuator untuk mengatur variabel fisis yang masuk ke sistem. Dalam dunia industri, kendali yang sering digunakan adalah *control valve*, motor AC, motor DC serta roda gigi.
3. *Plant* adalah sistem yang dikendalikan.
4. *Sensor/ Transmitter* adalah alat yang mengubah variabel keluaran menjadi variabel lain yang dapat membandingkan keluaran dengan sinyal masukan acuan.
5. *Disturbance/ Load* adalah gangguan masuk yang pada sistem yang akan mempengaruhi tercapainya nilai yang

diinginkan. Kendali yang baik dapat mengatasi adanya gangguan.

2.6.2 Kestabilan Sistem Pengendalian

Sistem pengendalian terdiri dari empat jenis kendali, diantaranya adalah :

a. *ON-OFF*

Kendali *on-off* yaitu jenis kendali yang memanipulasi sinyal *error* menjadi sinyal yang memiliki perintah *on* dan sinyal kendali yang bernilai *off*. Respon dari proses akan mengalami osilasi membentuk grafik sinusoidal. Hasil respon yang dibandingkan dengan *set point* memiliki *error* kurang dari 5% dan 2% maka pengendalian jenis ini dapat digunakan.

b. *Proportional (P)*

Proportional yaitu jenis kendali yang digunakan untuk memperkecil amplitudo dari hasil osilasi respon. Secara matematis hubungan antara antara keluaran pengendalian dan sinyal kesalahan kendali dapat ditunjukkan pada persamaan 2.43.

$$m(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2.43)$$

keterangan :

$m(t)$ = keluaran sistem pengendali

$e(t)$ = sinyal kesalahan kendali

Aplikasi dasar yang sederhana dengan kendali P ini cukup mampu untuk memperbaiki respon transien khususnya *rise time* dan *settling time*.

c. *Proportional Integral (PI)*

Proportional Integral dapat digunakan untuk membuat respon tidak mengalami osilasi, karena pengendalian jenis ini dapat membuat respon menuju *set point* secara eksponensial. Secara matematis pengendalian ini dapat ditunjukkan pada persamaan 2.44.

$$m(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad (2.44)$$

keterangan :

K_p = konstanta proposional

T_i = waktu integral.

d. *Proportional Integral Derivative (PID)*

Proportional Integral Derivative merupakan kombinasi dari 3 pengendali yaitu pengendali proporsional, pengendali integral dan pengendalian derivatif yang disusun secara paralel sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.4. Ketiga jenis pengendali ini memberikan respon yang berbeda – beda pada persamaan orde satu, orde dua, dan orde banyak. Kemampuan reaksi dapat dipercepat dengan maka diperlukan pengendali derivatif, sehingga kekurangan yang ada pada pengendali integral dapat ditutupi. Jadi, ketiga pengendali masing – masing berguna untuk mempercepat reaksi sistem, menghilangkan *offset*, dan mendapatkan energi ekstra di saat awal perubahan beban. Keluaran dari pengendalian ini merupakan penjumlahan dari keluaran pengendalian P, pengendalian I dan pengendalian D.

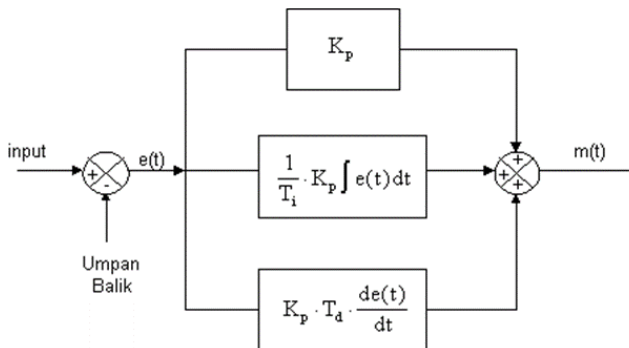
Sistem pengendalian PID ditunjukkan pada persamaan 2.45.

$$Gc(t) = Kp \left[e(t) + \frac{1}{Ti} \int e(t) dt + Td \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (2.45)$$

Fungsi transfer dinyatakan pada persamaan 2.46 dan 2.47 :

$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{Ti s} + T_d s \right) \quad (2.46)$$

$$K(s) = \frac{Kp(1+Ti s+Ti Td s^2)}{Ti s} \quad (2.47)$$



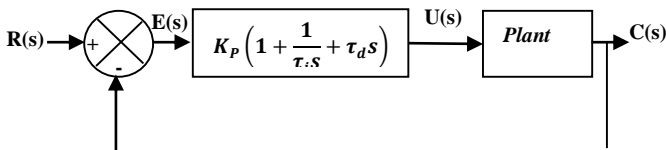
Gambar 2.4 Diagram Blok Kendali PID (Hespana, 2009)

Karakteristik pengendalian PID sangat dipengaruhi oleh besaran dari ketiga parameter P, I dan D. Pengaturan konstanta Kp , Ti dan Td akan mengakibatkan munculnya sifat dari masing –

masing parameter. Satu atau dua dari ketiga konstanta dapat diatur lebih menonjol dibandingkan dengan yang lain, konstanta yang menonjol yang akan memberikan pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan.

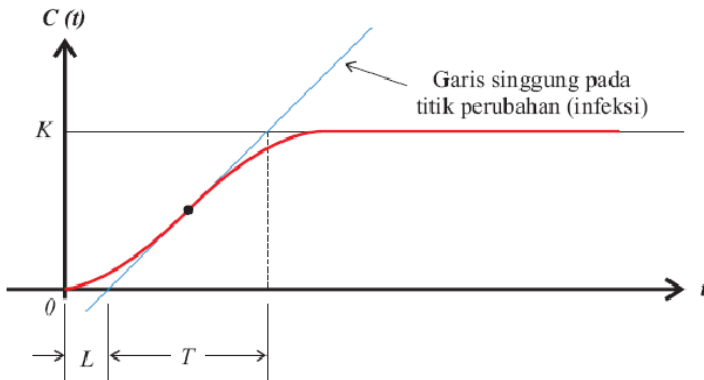
Penggunaan pengendalian baik P, PI, maupun PID disesuaikan dengan kebutuhan dan karakteristik dari proses yang dikendalikan. Pengendalian P digunakan apabila adanya *offset* masih dapat ditoleransi oleh proses. *Offset* yang tidak dapat ditoleransi, maka pengendalian PI dapat digunakan untuk memperbaiki performasi sistem. Pengendalian PID digunakan pada sistem pengendalian yang memiliki karakteristik pengendalian yang lambat seperti pengendalian temperatur. Performansi yang optimal dapat diperoleh pada algoritma pengendalian PID, maka perlu dilakukan penalaan terhadap nilai parameter PID yaitu K_p , T_i , T_d .

Metode yang dapat digunakan adalah metode *Ziegler – Nichols*. Metode ini yang bertujuan mencapai maksimum *overshoot* 25 %. Nilai parameter K_p , T_i dan T_d berdasarkan pada respon *step* sistem secara eksperimental atau berdasarkan pada nilai K_p yang dihasilkan dalam keadaan stabil bila hanya aksi kendali proporsional yang digunakan.



Gambar 2. 5 Diagram Blok Kendali PID Ziegler-Nichols (Lewis, 1992)

Perancangan pengendali *Ziegler–Nichols* digunakan untuk mendapatkan respon sistem terhadap masukan sinyal *step*. Jika sistem tidak mengandung *integrator*, maka kurva respon *step* dari sistem membentuk seperti huruf S. Kurva respon *step* dapat dihasilkan secara eksperimen atau dari simulasi dinamik sistem. Bentuk respon *step* sistem yang membentuk huruf S ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Kurva Respon Step (Lewis, 1992)

Nilai parameter K_p , T_i dan T_d dapat ditunjukkan pada Tabel

2.4.

Tabel 2. 3 Parameter K_p , T_i dan T_d (Lewis, 1992)

Tipe Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0,9 T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2 T/L$	$2L$	$0,5L$

Pengendali PID akan mengantisipasi terjadinya *error* dan menerapkan aksi kendali yang proporsional terhadap perubahan laju *error*. Pengendali PID akan memiliki respon yang hampir sama dengan gabungan pengendalian PI. Hasil respon dapat dilihat dari adanya aksi kendali integral yang membuat lambat terjadinya respon. Peningkatan kecepatan dari respon dapat dilakukan dengan memperbesar nilai K_c , tetapi nilai K_c yang terlalu besar akan membuat sistem lebih berosilasi dan berakibat terjadinya ketidakstabilan. Peran derivatif yang akan membuat sistem menjadi lebih stabil, sehingga dapat menambah kecepatan respon dengan memperbesar nilai K_c sehingga tetap menjaga besarnya *overshoot* dan rasio penurunan.

2.6.3 Perhitungan Parameter Kendali dengan Metode Ziegler-Nichols

Nilai dari parameter pengendalian ditunjukkan pada Tabel

2.5.

Tabel 2. 4 Rumus *Ziegler-Nichols* (Lewis, 1992)

Tipe Pengendali	Pengendali Proporsional (Kp)	Waktu Integral (Ti)	Waktu Derivatif (Td)
Proporsional	Kc/2	-	-
Proporsional-Integral	Kc/2,2	Tc/1,2	-
Proporsional-Integral-Derivatif	Kc/1,7	Tc/2	Tu/8

Metode ini terdapat dua karakteristik dinamik yaitu :

- a. *Ultimate* kendali (Kc)
- b. *Ultimate* periode (Tc)

Langkah-langkah untuk melakukan perhitungan parameter kendali antara lain :

1. Nilai kendali P diatur yaitu dengan cara mengatur nilai Ti pada harga maksimum atau minimum dan Td adalah nol.
2. *Set automatic* diatur sampai Kc mendapatkan hasil amplitudo yang tetap.
3. Hasil waktu yang dikendalikan maka periode osilasi diukur sebagai Tu.
4. Parameter Kc dan Tu dimasukkan pada Tabel 2.5.

2.7 Standar *Maneuverability*

Prosedur yang digunakan untuk uji *maneuvering* mengacu kepada peraturan standar kemampuan manuver kapal yang direkomendasikan oleh *International Maritime Organization* (IMO) yakni resolusi MSC.137 (76) annex.6 tertanggal 4 Desember 2002 dan mulai diterapkan sejak tanggal 1 Januari 2004, yang mana resolusi ini merupakan amandemen terhadap resolusi sebelumnya yakni A.751 (18) mengenai standar kemampuan manuver kapal.

Tabel 2. 5 Standar Manuverabilitas Kapal oleh IMO (Resolution MSC, 2002)

Jenis Kemampuan	Pengujian	Kriteria
<i>Turning ability</i>	<i>Turning test with max. Rudder angle (35°)</i>	<i>Advanced</i> < 4,5 L <i>Tactical Diameter</i> < 5,0 L
<i>Initial turning ability</i>	10°/ 10° Z-test	<i>Distance ship run before 2nd rudder execution</i> < 2,5 L
<i>Stopping ability</i>	<i>Stopping test with full astern</i>	<i>Track reach</i> < 15 L
<i>Course keeping and yaw checking ability</i>	10°/ 10° Z-test	1 st <i>Overshoot</i> < 10° (L/U < 10 s) < (5 + 0,5 (L/U))° (10 s < L/U < 30 s) < 20° (30 s < L/U) 2 nd <i>Overshoot</i> < 25° (L/U < 10 s) < (17,5 + 0,75 (L/U))° (10 s < L/U < 30 s) < 40° (30 s < L/U)

Aturan standar manuver kapal didasarkan atas kemampuan manuver kapal dapat dievaluasi berdasarkan karakteristik dari pengujian manuver seperti biasanya atau secara konvensional. Kapal yang dimaksud adalah kapal yang memiliki panjang 100 meter atau lebih dengan menggunakan sistem propulsi dan sistem kemudi (*steering*) konvensional yakni gaya dorong kapal dihasilkan oleh *propeller* yang digerakan oleh poros *propeller*. IMO telah merekomendasikan beberapa kriteria standar untuk manuverabilitas kapal. Kriteria tersebut harus dipenuhi oleh sebuah kapal saat beroperasi baik di perairan yang dalam (*deep water*) maupun di perairan terbatas atau beroperasi di sekitar pelabuhan atau di perairan yang dangkal (*restricted and shallow water*). Standar pengujian yang diperlukan dalam manuver kapal disyaratkan dalam IMO Resolusi MSC 137 76 (2002).

2.8 Indeks Stabilitas Yaw

Stabilitas *yaw* adalah kemampuan untuk bergerak lurus maju tanpa adanya gangguan eksternal (misalnya angin) di salah satu sudut kemudi. Stabilitas *yaw* ditunjukkan dengan persamaan 2.48.

$$C' = \frac{N'_r - m'x'_g}{Y'_r - m'} - \frac{N'_v}{Y'_v} \quad (2.48)$$

Nilai C' positif menunjukkan stabilitas *yaw*, nilai C' negatif menunjukkan ketidakstabilan *yaw*. Ketidakstabilan *yaw* adalah kecenderungan kapal untuk meningkatkan nilai absolut dari sudut penyimpangan yang ada, namun rumus numerik ini sangat sensitif dan koefisien diukur sering tidak akurat untuk memprediksi stabilitas *yaw*. Ketidakakuratan tersebut disebabkan stabilitas *yaw* sangat sensitif terhadap perubahan kecil yang diakibatkan gaya pada badan kapal, maka biasanya diperlukan analisis yang lebih rumit untuk menentukan stabilitas *yaw*.

2.9 Root-Locus

Root locus adalah suatu metode sederhana untuk mencari akar-akar persamaan karakteristik telah ditemukan oleh W.R. Evans sehingga digunakan secara luas dalam teknik pengendalian. Metode ini disebut metode *root-locus*, merupakan suatu metode dengan menggambar akar-akar persamaan karakteristik untuk semua harga dari suatu parameter sistem. Metode *root-locus* memungkinkan kita untuk mencari *pole-pole loop* tertutup dari *pole* dan *zero loop* terbuka dengan penguatan parameter. Metode ini menghilangkan kesulitan-kesulitan yang timbul pada teknik klasik dengan memberikan peragaan grafis semua *pole loop* tertutup untuk semua harga penguatan fungsi transfer *loop* terbuka. Suatu sistem yang stabil harus memiliki *pole loop* tertutup yang seluruhnya terletak disebelah kiri sumbu imajiner. Ringkasan aturan untuk menggambar *root-locus* dari sebuah sistem adalah.

- a. Menentukan persamaan karakteristik sistem dengan rumus matematis yang ditunjukkan pada persamaan 2.49.

$$1 + G(s)H(s) = 0 \quad (2.49)$$

Maka akan diperoleh persamaan 2.50.

$$1 + \frac{K(s+z_n)}{(s+p_n)} = 0 \quad (2.50)$$

- b. Meletakkan *pole* (p_n) dan *zeronya* (z_n) pada bidang s .
- c. Menentukan rentang terdapatnya *root-locus* pada sumbu nyata. Rentang daerah sumbu nyata yang mempunyai jumlah *pole* dan atau *zero* di sebelah kanannya bernilai ganjil, maka daerah tersebut terdapat *root locus*.
- d. Menentukan jumlah asimtot, sudut asimtot, dan perpotongan asimtot dengan sumbu nyata.
- e. Menentukan titik pencar dan titik temu *polenya* (*break away point* dan *break-in point*)
- f. Menentukan titik potong kurva *root locus* dengan sumbu khayal (jika ada)
- g. Menentukan sudut datang (untuk *zero*) dan sudut berangkat (untuk *pole*)
- h. Sketsa *root-locus* dari data-data yang telah didapatkan.

Penggambaran diagram *root-locus* diperlukan sebuah busur dan sebuah penggaris. Penggunaan busur dan lengan putar akan sangat mempermudah dalam pemeriksaan syarat sudut dari titik uji. Diagram *root-locus* juga dapat digambarkan dengan menggunakan *software* MATLAB. Langkah-langkah yang dilakukan adalah

- a. Menentukan persamaan karakteristik yaitu persamaan 2.50.
- b. Persamaan 2.50 dirubah menjadi persamaan karakteristik MATLAB.

$$1 + \frac{K(num)}{(den)} = 0 \quad (2.51)$$

- c. Memasukkan kode program MATLAB untuk mendapatkan diagram *root-locus*.

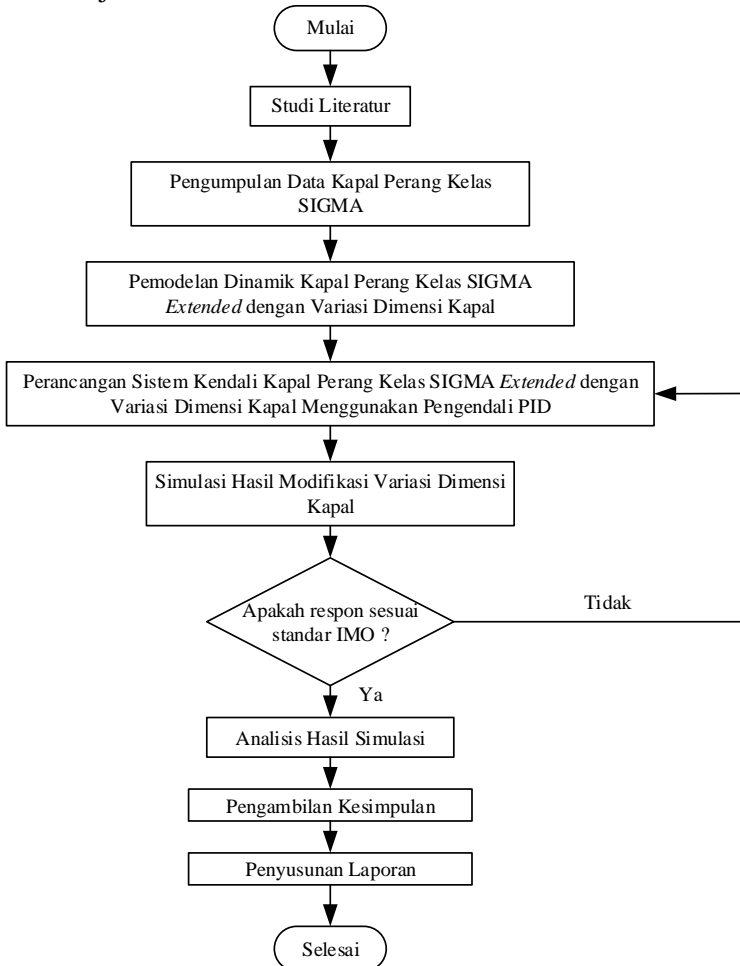
```
>> num = [1 z_n]
>> den = [1 p_n]
>> rlocus(num, den)
```

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Langkah-langkah dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir ini ditunjukkan oleh Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram Alur Pelaksanaan Penelitian Tugas Akhir

3.1 Studi Literatur

Studi literatur adalah untuk memahami teori-teori yang berkaitan dengan tugas akhir, maka diperlukan studi literatur yang berhubungan erat dengan otomasi standar kapal dan beberapa referensi dari penelitian sebelumnya. Studi literatur yang dimaksud yaitu pemahaman mengenai kapal Perang Kelas SIGMA *Extended*, koefisien hidrodinamika pada kapal, sistem pengendalian otomatis dengan menggunakan pengendalian PID sangat diperlukan. Teori didapatkan dari sumber yang berupa jurnal-jurnal penelitian yang sudah pernah dilakukan dan juga studi teoritis dari *handbook* dengan tema kendali kapal laut dan arsitektur kelautan. Penelitian ini dilakukan secara simulasi dengan menggunakan bantuan *software* MATLAB R2009, maka diperlukan pembelajaran tentang pemrograman yang akan dijalankan.

3.2 Pengumpulan Data Kapal Perang Kelas SIGMA

Data yang digunakan pada penelitian ini berupa spesifikasi kapal Perang KRI Diponegoro Kelas SIGMA *Extended*, meliputi panjang, lebar kapal, sarat, *displacement*, kecepatan, koefisien blok, spesifikasi gravitasi, luasan *rudder*, jari-jari girasi, massa non dimensional, dan spesifikasi gravitasi non dimensional. Data spesifikasi kapal digunakan sebagai masukan untuk mendapatkan koefisien hidrodinamika. Koefisien hidronimika tersebut yang akan menjadi variabel – variabel penyusun persamaan untuk memodelkan kapal. Kapal Perang KRI Diponegoro kelas SIGMA *Extended* dalam penelitian ini merupakan pengembangan dari kapal perang model lama dimana dilakukan modifikasi untuk meningkatkan kemampuan stabilitas dan *sea keeping* yang lebih baik.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Kapal Perang KRI Diponegoro Kelas SIGMA *Extended* (Firdianda, Aisjah, & Masroeri, 2013)

Besaran		Satuan	
Lpp	Panjang	106 m	106 m
U	Kecepatan	27.9 knot	14.4 m/s
B	Lebar	14 m	14 m
T	Sarat	3.7 m	3.7 m
C _B	Koefisien blok	0.44	0.44
X _G	Spesifikasi gravitasi	2.22	2.22
A _δ	Luasan <i>rudder</i>	3.856 m ²	3.856 m ²
m	<i>Displacement</i>	2423 ton	2423000 kg
R	Jari-jari girasi	21.1 m	21.2 m
m'	Massa non dimensi	0,0040126	0,0040126
X _{G'}	Spesifikasi gravitasi non dimensi	0	0

3.3 Pemodelan Dinamika Kapal

3.3.1 Pemodelan Dinamika Kapal Perang Kelas SIGMA *Extended* dengan Variasi Dimensi Kapal

Berdasarkan teori persamaan *maneuvering* kapal yang telah dijelaskan pada Bab II, pemodelan dinamika kapal dilakukan berdasarkan data spesifikasi kapal yang telah diperoleh dengan menggunakan pendekatan matematis Nomoto orde II (1957). Parameter yang telah diketahui disubstitusikan ke dalam persamaan 2.24 sampai dengan 2.41 untuk mendapatkan koefisien hidrodinamika kapal. Nilai – nilai koefisien hidrodinamika kapal perang Kelas SIGMA KRI Diponegoro *Extended* ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Koefisien Hidrodinamika Kapal Perang Kelas SIGMA KRI Diponegoro *Extended*

Koefisien Hidrodinamika	Nilai Koefisien Hidrodinamika
$-Y'_v$	0,004505
$-Y'_r$	0,000158
$-Y'_v$	0,006371
$-Y'_r$	-0,001959
Y_δ	-0,007720
$-N'_v$	-0,000038
$-N'_r$	0,000260
$-N'_v$	0,002233
$-N'_r$	0,001238
N_δ	0,003859
Iz'	0,000163
Ir'	0,000161

Nilai-nilai koefisien hidrodinamika pada Tabel 3.2 diperoleh dari persamaan 2.24 sampai dengan 2.41. Koefisien hidrodinamika tersebut digunakan untuk mencari fungsi transfer dari model kapal. Nilai-nilai koefisien hidrodinamika sangat berpengaruh terhadap stabilitas kapal.

Besarnya koefisien hidrodinamika pada Tabel 3.2 di substitusikan ke dalam persamaan 2.14 sampai dengan 2.16 dan diperoleh besarnya matriks yang ditunjukkan pada persamaan 3.1 sampai persamaan 3.3.

$$M' = \begin{bmatrix} 0,008517 & 0,000158 \\ -0,000038 & 0,001397 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$N' = \begin{bmatrix} 0,006374 & 0,002053 \\ 0,002233 & 0,001238 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$b' = \begin{bmatrix} 0,007718 \\ -0,003859 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Bentuk non dimensi pada persamaaan 3.1 sampai dengan 3.3 dapat diubah ke bentuk dimensi dengan *Prime-System I* dan hasilnya ditunjukkan pada persamaan 3.5 sampai 3.7

$$M = \begin{bmatrix} 0,004382 & 0,008606 \\ -0,000019 & 0,023050 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$N = \begin{bmatrix} 0,000444 & -0,014470 \\ 0,000156 & 0,009143 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$b = \begin{bmatrix} 0,007718 \\ -0,003859 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Dimana :

- M' = M non dimensi
- N' = N non dimensi
- b' = b non dimensi
- M = matriks inersia
- N = matriks *coriolis* dan redaman
- b = vektor dari *rudder*

Parameter Nomoto ini yang akan diwujudkan ke dalam model dinamika kapal ditunjukkan pada persamaan 3.7 sampai dengan 3.10.

$$T_1 T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)} = 16,030773 \quad (3.7)$$

$$K_R = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)} = 0,461764 \quad (3.8)$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det(N)} = 7,713468 \quad (3.9)$$

$$K_R T_3 = \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{\det(N)} = 2,655671 \quad (3.10)$$

Parameter Nomoto disubstitusikan ke dalam persamaan 2.18 sampai dengan 2.21, sehingga didapat fungsi transfer kapal berdasarkan pendekatan Nomoto ditunjukkan pada persamaan 3.11.

$$\frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} = \frac{2,655671s + 0,461764}{16,030773s^3 + 7,713468s^2 + s} \quad (3.11)$$

Fungsi transfer pada persamaan 3.11 merupakan fungsi transfer dari kapal perang Kelas SIGMA *Extended* dengan panjang kapal yaitu 106 meter. Variasi dimensi kapal akan menyebabkan koefisien hidrodinamika yang berbeda pula. Kapal perang memiliki rentang nilai koefisien blok antara 0,4 sampai dengan 0,6. Oleh karena itu, langkah awal dari penelitian ini yaitu mencari panjang yang memiliki rentang koefisien blok antara 0,4 sampai dengan 0,6. Koefisien blok didapatkan dari perpanjangan kapal dengan kenaikan setiap 1%. Variasi dimensi kapal dibatasi sampai dengan perpanjangan kapal hingga 10%, dikarenakan hingga batas tersebut nilai koefisien blok kapal perang masih dalam rentang yang ditentukan yaitu 0,4 sampai dengan 0,6. Perubahan koefisien blok berubah maka akan berubah pula besarnya koefisien yang lainnya.

Perubahan besarnya koefisien akan mempengaruhi sistem kendali pada kapal.

Data perubahan koefisien hidrodinamika pada Tabel 3.3 ditunjukkan bahwa kapal perang KRI Diponegoro Kelas SIGMA dapat diperpanjang mencapai 110%.

Tabel 3. 3 Nilai Koefisien Blok Akibat Perubahan Panjang Kapal (L_{pp})

No	Perpanjangan	Panjang Kapal (meter)	Koefisien Blok	ΔC_B
1	100%	106	0,44	0
2	101%	107,06	0,436	0,004356
3	102%	108,12	0,4314	0,008627
4	103%	109,18	0,4272	0,012816
5	104%	110,24	0,4231	0,016923
6	105%	111,3	0,419	0,020952
7	106%	112,36	0,4151	0,024906
8	107%	113,42	0,4112	0,028785
9	108%	114,48	0,4074	0,032593
10	109%	115,54	0,4037	0,036330
11	110%	116,6	0,4	0,040000

Perubahan koefisien blok akibat perubahan dimensi panjang kapal akan mempengaruhi perubahan pada koefisien hidrodinamika lainnya. Perubahan koefisien hidrodinamika dapat diketahui pada hasil perpanjangan kapal maka dilakukan perhitungan matematis dengan persamaan 2.24 sampai dengan 2.41. Hasil perhitungan matematis kapal ditunjukkan pada Tabel 3.4 dan Tabel 3.5.

Halaman ini sengaja dikosongkan

3.3.2 Pemodelan *Rudder*

Rudder yang digunakan memiliki spesifikasi nilai k sebesar 0,0015789 dan *time constant* sebesar 0,05 (Abdullah & Aisjah, 2016). Pemodelan *rudder* didapatkan dengan menggunakan pendekatan matematis pada persamaan 2.37. Spesifikasi *rudder* disubstitusikan pada persamaan 2.43 dan didapatkan pemodelan *rudder* yang ditunjukkan pada persamaan 2.38.

$$\delta = \frac{0,0015789}{0,05s+1} \quad (3.12)$$

3.3.3 Pemodelan Gangguan Gelombang

Pemodelan gangguan yang mempengaruhi manuvering kapal salah satunya adalah gelombang dengan tipe gangguan *sea state 7* yang memiliki tinggi gelombang 6 meter. Pemodelan dilakukan berdasarkan pada spektrum Pierson-Moskowitz yaitu persamaan gelombang orde 2. Langkah-langkah untuk menentukan model gangguan dengan mengacu pada persamaan 2.39.

$$\max P_{yy}(\omega) = P_{yy}(\omega_0) = \sigma_\omega^2 = 10 \quad (3.13)$$

$$\sigma_\omega = 3.16 \quad (3.14)$$

$$\xi = 0.1 \quad (3.15)$$

$$\text{Ketinggian gelombang (H)} = 6 \text{ m} \quad (3.16)$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2 \quad (3.17)$$

Parameter yang telah diketahui disubstitusikan ke dalam persamaan ω_0 yang ditunjukkan pada persamaan 3.18.

$$\omega_0 = 0,4 \sqrt{g/h} = 0,4 \sqrt{\frac{9,8}{6}} = 0,51121 \quad (3.18)$$

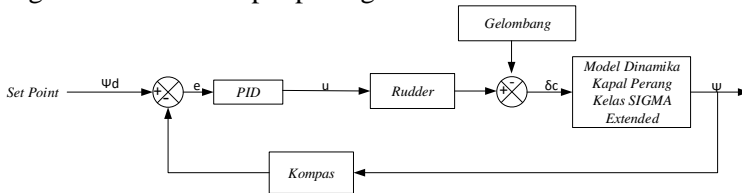
$$K\omega = 2 \times \xi \times \omega_0 \times \sigma_\omega = 0,3231 \quad (3.19)$$

Jadi, model gangguan *sea state 7* dengan tinggi gelombang 6 meter adalah.

$$h(s) = \frac{0,3231 s}{s^2 + 0,102 s + 0,261} \quad (3.20)$$

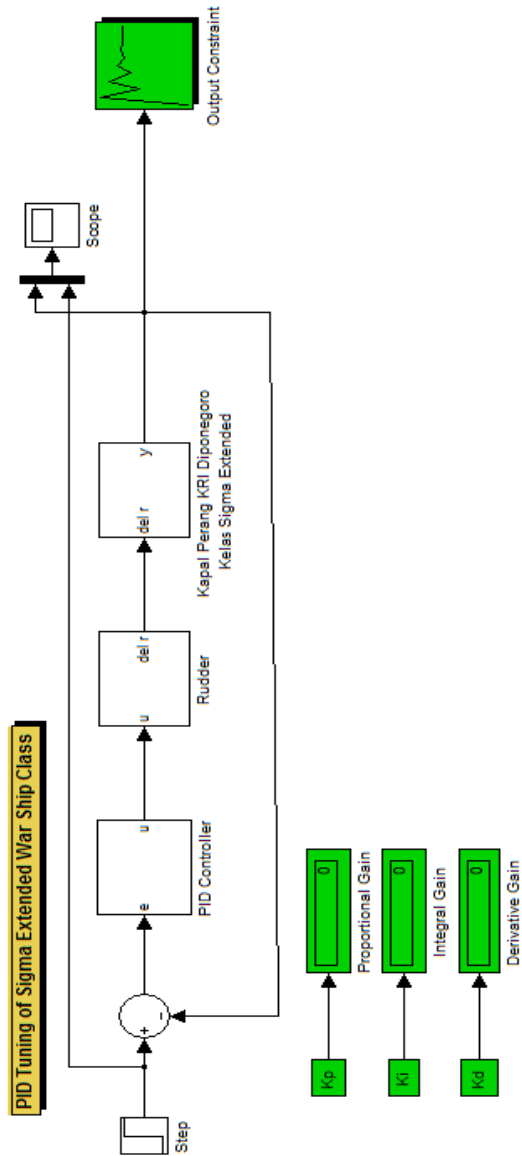
3.4 Perancangan Sistem Kendali pada Kapal Perang Kelas SIGMA *Extended* dengan Variasi Dimensi Kapal Menggunakan Kendali PID

Diagram blok pengendalian diperlukan sebagai dasar jalannya suatu sistem. Gambar 3.2 adalah perancangan diagram blok pengendalian untuk kapal perang Kelas SIGMA *Extended*.



Gambar 3. 2 Diagram Blok Sistem Pengendalian Manuver Kapal Perang KRI Diponegoro Kelas SIGMA *Extended*

PID terdiri dari tiga bagian yaitu *Proportional*, *Integral* dan *Derivative*. Pengujian performansi dikendalikan menggunakan kendali PID. Kendali PID akan mengantisipasi terjadinya *error* dan menerapkan aksi kendali yang proporsional terhadap perubahan laju *error*. Nilai K_p , K_i dan K_d didapatkan dengan menggunakan bantuan MATLAB R2009a seperti yang terlihat pada Gambar 3.3. Proses *tunning* PID dilakukan untuk memperoleh nilai pengendali proposional, pengendali integral, dan pengendali derivatif yang paling baik untuk setiap panjang kapal. Proses *tunning* dilakukan dengan merancang sistem kendali pada *simulink* yang telah ada pada MATLAB R2009a. Parameter *simulink* yang digunakan terdapat masukan sinyal *step*, kendali PID, aktuator berupa *rudder*, sistem kapal, serta parameter yang digunakan untuk menampilkan hasil *tunning* dan grafik responnya. Model dinamika kapal dimasukkan ke dalam *simulink*, maka dengan melakukan proses *tunning* akan diketahui nilai *gain* pengendali PID dari sistem.



Gambar 3. 3 Blok Diagram Simulink PID Kapal Perang Kelas SIGMA KRI Diponegoro *Extended*

3.5 Simulasi Hasil Modifikasi Variasi Dimensi Kapal

Simulasi hasil modifikasi dilakukan dengan simulasi hasil modifikasi yang telah dirancang. Tujuan simulasi untuk mengetahui respon sistem apabila dimensi kapal diubah-ubah sudah sesuai dengan standar atau belum. Pengujian dilakukan terhadap sistem kendali PID untuk mengetahui *manuverability* kapal pada, uji *open loop*, uji *root locus*, uji indeks stabilitas *yaw*, serta melakukan uji *turning* pada setiap perubahan dimensi panjang kapal. Pengujian dilakukan dengan simulasi pada *software* MATLAB *simulink* R2009a.

3.5.1 Uji Root-Locus

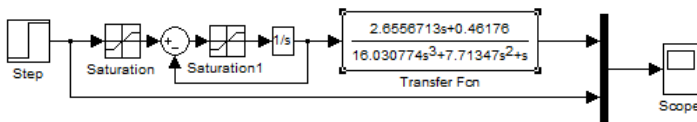
Analisis *root-locus* dilakukan terhadap fungsi transfer dinamika kapal KRI Diponegoro. Penggambaran diagram *root-locus* dilakukan untuk mengetahui kestabilan dari fungsi transfer kapal. Penggambaran diagram dilakukan secara komputasi dengan MATLAB.

3.5.2 Uji Indeks Stabilitas Yaw

Analisis indeks stabilitas *yaw* bertujuan untuk mengetahui stabilitas *yaw* dari kapal KRI Diponegoro. Nilai indeks stabilitas *yaw* dari kapal didapatkan dengan cara numerik menggunakan persamaan 2.46.

3.5.3 Uji Open Loop Sistem Kapal

Uji *open loop* sistem bertujuan untuk mengetahui kesesuaian hasil respon dari sistem. Untuk mengetahui sistem yang dirancang telah bekerja dengan baik, maka sistem diberi masukan *step*. Uji *open loop* sistem kapal perang Kelas Sigma KRI Diponegoro *Extended* ditunjukkan pada Gambar 3.4. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *simulink* pada program MATLAB.



Gambar 3. 4 Uji *Open Loop* Kapal Perang Kelas Sigma KRI Diponegoro *Extended*

3.5.6 Uji *Turning*

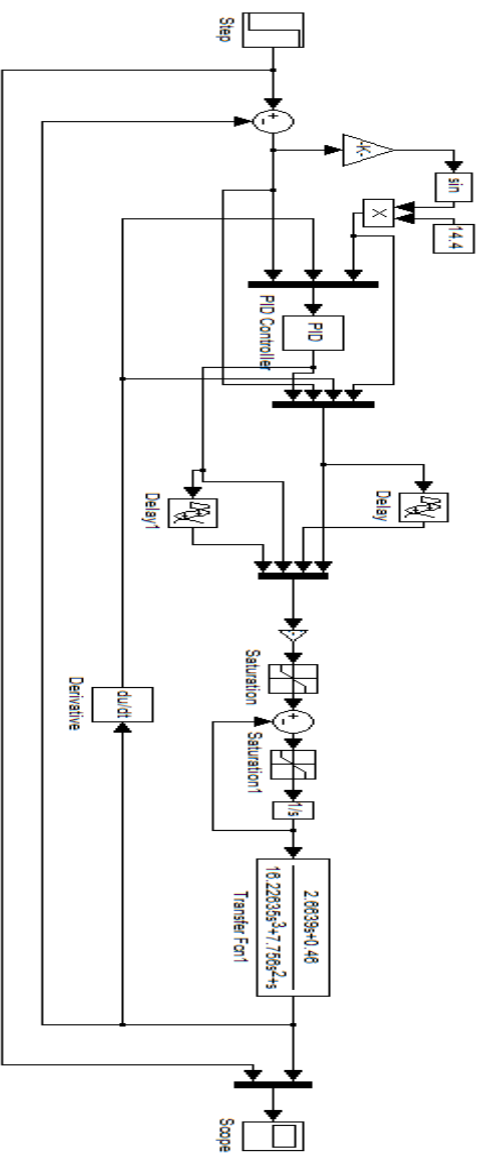
Uji *turning* ini menggunakan *initial value* sebesar 20° dan 30° . Uji *turning* dilakukan untuk mengetahui karakteristik sistem pada saat kondisi *closed loop* atau dengan kendali. Kendali yang digunakan yaitu kendali PID yang telah dirancang. Pengujian dilakukan dengan 2 strategi yaitu uji *turning* tanpa gangguan dan uji *turning* dengan gangguan. Gangguan yang digunakan berupa tinggi gelombang 6 meter. Uji *turning* dilakukan dengan menggunakan simulasi pada *software* MATLAB *simulink* R2009a yang ditunjukkan pada Gambar 3.5 untuk uji *turning* tanpa gangguan dan Gambar 3.6 untuk uji *turning* dengan gangguan.

3.6 Analisis Hasil Simulasi

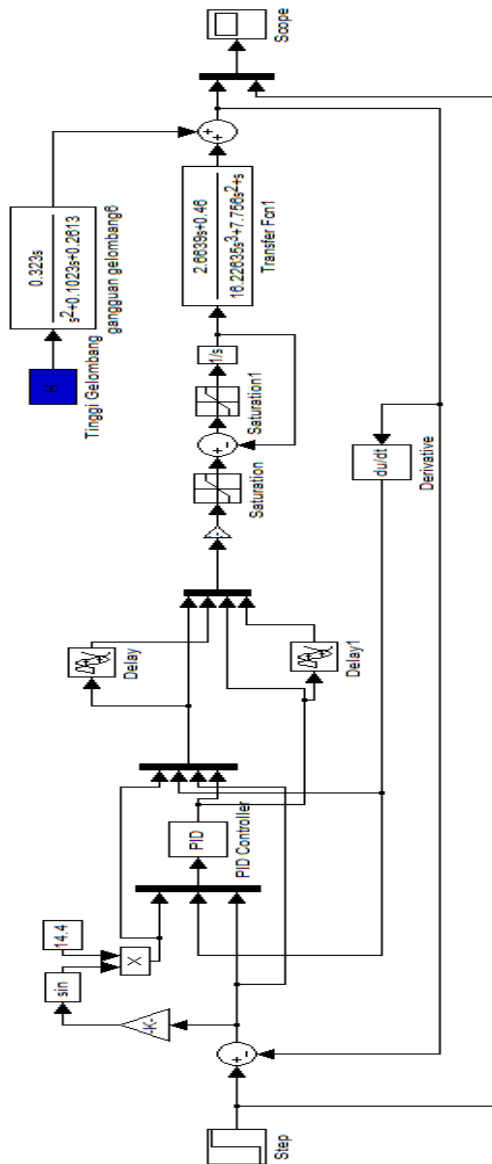
Analisis data dilakukan pada saat perubahan koefisien hidrodinamika yaitu panjang kapal yang dapat mempengaruhi performansi kapal. Performansi kapal yaitu sensitivitas kapal dilihat dari pergerakan *pole*, *zero*, serta nilai ΔG dari model dinamika kapal. Sistem kendali diuji kesesuaiannya dengan kriteria yaitu mencapai nilai indeks performansi sesuai standar. Untuk kriteria yang ditetapkan yaitu koefisien blok dari hasil perpanjangan kapal terletak diantara rentang 0,4 sampai dengan 0,6 serta letak akar-akarnya terdapat di sebelah kiri sumbu imajiner.

3.7 Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan dilakukan setelah selesai melakukan pengumpulan data, perhitungan, perancangan sistem kendali, dan analisis yang kemudian mendapatkan kesimpulan keseluruhan kegiatan penelitian ditulis ke dalam bentuk laporan akhir agar kegiatan selama penelitian dapat dipertanggungjawabkan dan berguna bagi peneliti selanjutnya.



Gambar 3.5 Diagram Blok Uji *Turning* Tanpa Gangguan



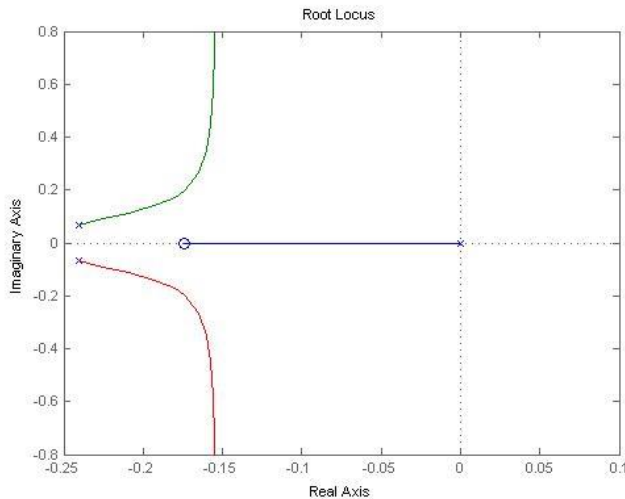
Gambar 3. 6 Diagram Blok Uji *Turning* dengan Gangguan

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Uji *Root-Locus*

Uji *root-locus* berguna untuk mengetahui kestabilan dari fungsi transfer dinamika kapal KRI Diponegoro Kelas SIGMA *Extended*. Gambar 4.1 merupakan diagram *root-locus* yang menggambarkan akar-akar persamaan karakteristik *open-loop* pada sistem kapal KRI Diponegoro Kelas SIGMA *Extended* dengan panjang 106 meter.



Gambar 4. 1 Diagram *Root-Locus Open-Loop* Kapal KRI Diponegoro Kelas SIGMA *Extended* dengan Panjang 106 Meter

Berdasarkan Gambar 4.1 didapati bahwa nilai *zero* dan *pole* adalah.

$$z_1 = -0.1739$$

$$p_1 = 0; p_2 = -0,2406 + 0,0671 i ; p_3 = -0,2406 - 0,0671 i$$

Seluruh akar-akar dari fungsi transfer kapal berada pada ruas sebelah kiri yang menandakan bahwa sistem stabil.

Kestabilan dari kapal yang telah dimodifikasi dapat dilihat dengan uji *root locus* supaya untuk mengetahui posisi akar-akar

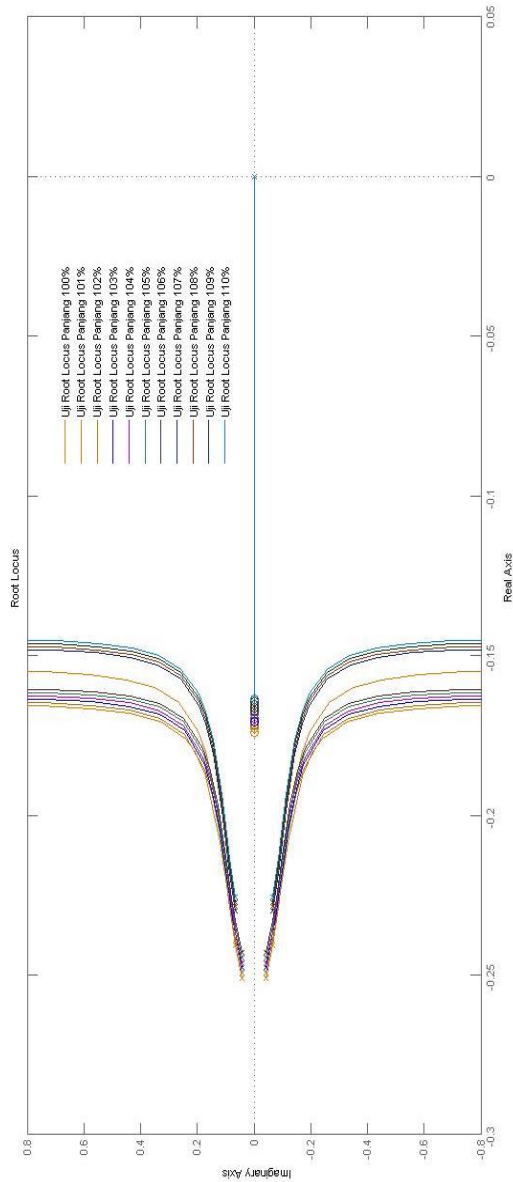
dari persamaan dinamiknya. Tabel 4.1 adalah tabel nilai akar-akar untuk setiap panjang kapal.

Tabel 4. 1 Nilai Akar-akar Panjang Kapal 100% sampai Panjang 110%

Lpp (meter)	<i>Pole</i> 1	<i>Pole</i>		<i>Zero</i>
		<i>Pole 2</i>	<i>Pole 3</i>	
106	0	-0,2406+0,0671i	-0,2406-0,0671i	-0,1739
107,06	0	-0,2390+0,0671i	-0,2390-0,0671i	-0,1728
108,12	0	-0,2375+0,0670i	-0,2375-0,0670i	-0,1717
109,18	0	-0,2360+0,0670i	-0,2360-0,0670i	-0,1706
110,24	0	-0,2344+0,0670i	-0,2344-0,0670i	-0,1695
111,3	0	-0,2329+0,0670i	-0,2329-0,0670i	-0,1685
112,36	0	-0,2315+0,0670i	-0,2315-0,0670i	-0,1675
113,42	0	-0,2300+0,0670i	-0,2300-0,0670i	-0,1665
114,48	0	-0,2286+0,0670i	-0,2286-0,0670i	-0,1655
115,54	0	-0,2271+0,0670i	-0,2271-0,0670i	-0,1645
116,6	0	-0,2257+0,0670i	-0,2257-0,0670i	-0,1635

Hasil yang diperoleh pada Tabel 4.1 menyatakan bahwa setiap perpanjangan kapal akan menghasilkan pergeseran akar-akar persamannya sebesar antara 14 sampai dengan 16 satuan ke sebelah kanan atau mendekati sumbu imajiner untuk nilai *polenya*, sedangkan 11 atau 10 satuan ke sebelah kanan atau mendekati sumbu imajiner untuk nilai *zeronya*..

Gambar 4.2 merupakan diagram *root-locus* yang menggambarkan akar-akar persamaan karakteristik *open-loop* pada sistem kapal KRI Diponegoro Kelas SIGMA *Extended* dengan panjang kapal mulai dari perpanjangan 101% hingga 110%.



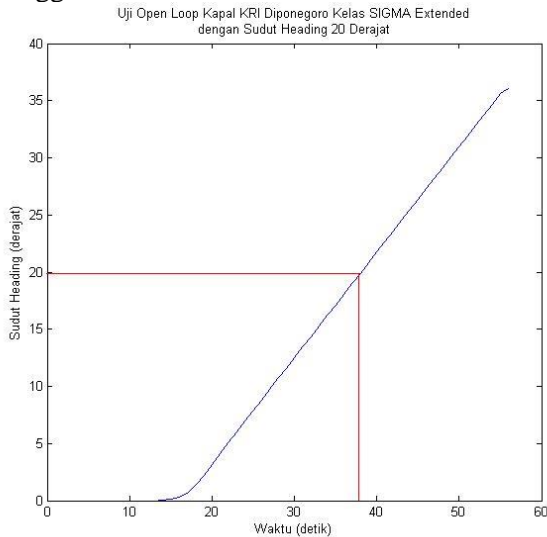
Gambar 4. 2 Pergeseran Diagram *Root-Locus Open Loop* Kapal KRI Diponegoro
Kelas SIGMA *Extended* dengan Panjang 101% sampai 110%

Halaman ini sengaja dikosongkan

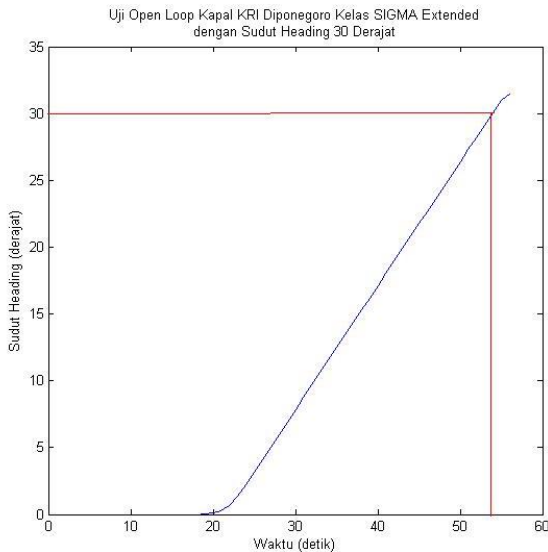
Uji *root locus* yang telah dilakukan dapat digunakan untuk melihat tingkat sensitivitas kapal. Sensitivitas kapal dapat dilihat dengan cara melihat pergeseran letak *pole* dan *zero* dari persamaan dinamik untuk setiap perpanjangan kapal. Dari hasil yang telah didapatkan yaitu Tabel 4.1 dan Gambar 4.2 menyatakan bahwa semua letak akar-akar dari persamaan dinamik kapal dapat dikatakan stabil dikarenakan semua terletak di sebelah kiri sumbu imajiner, tetapi semakin panjang kapal diperpanjang maka sensitivitasnya semakin kurang baik dikarenakan letak pergeseran *pole* dan *zero*nya semakin lama semakin bergeser ke kanan. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali kapal semakin tidak stabil.

4.2 Analisis Uji *Open Loop*

Pada uji *open loop* sistem yang terdiri dari *rudder* dan sistem kapal diberi masukan sinyal *step* dengan nilai akhir 20° dan 30° . Standar yang telah ditetapkan IMO bahwa uji kendali dilakukan dengan menggunakan sudut 20° dan 30° .



Gambar 4.3 Uji *Open Loop* Sudut *Heading* 20°



Gambar 4.4 Uji *Open Loop* Sudut Heading 30°

Nilai sinyal *step* menunjukkan *set point* sudut heading senilai 20° dan 30°. Uji *open loop* bertujuan untuk mengetahui respon sistem ketika tidak diberi kendali. Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 menunjukkan respon sistem dinamika kapal tanpa kendali. Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 menjelaskan bahwa respon sistem tampak seperti garis linear dimana perubahan sudut headingnya berubah konstan terhadap waktu. Sistem yang diberi masukan sistem sebesar 20°, maka dapat mencapai *set point* dalam waktu 39 detik dan saat masukan sebesar 30° sistem mencapai *setpoint* dalam waktu 54 detik. Kapal dapat dengan cepat mencapai *set point* yang ditentukan Hal ini dikarenakan tidak adanya kendali yang mempertahankan posisi kapal.

4.3 Analisis Uji Indeks Stabilitas

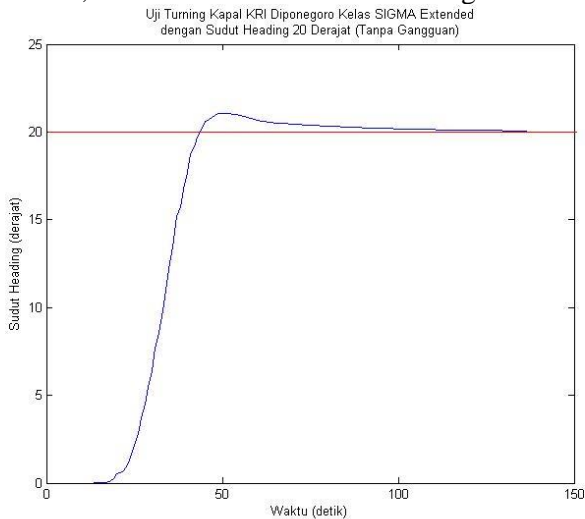
Stabilitas dari sebuah kapal dapat dianalisis berdasarkan parameter-parameter hidrodinamika yang dimiliki. Perhitungan parameter-parameter hidrodinamika dari kapal perang Kelas SIGMA *Extended* KRI Diponegoro telah dilakukan. Didapatkan

nilai indeks stabilitas kapal perang Kelas SIGMA *Extended* KRI Diponegoro sebesar 0.252541826.

Nilai C' positif, maka sistem dinyatakan stabil. Hasil perhitungan indeks stabilitas kapal perang Kelas SIGMA *Extended* KRI Diponegoro menyatakan bahwa kapal memiliki indeks stabilitas (C') bernilai positif. Hal ini berarti bahwa sistem kapal dinyatakan stabil.

4.4 Analisis Uji Turning

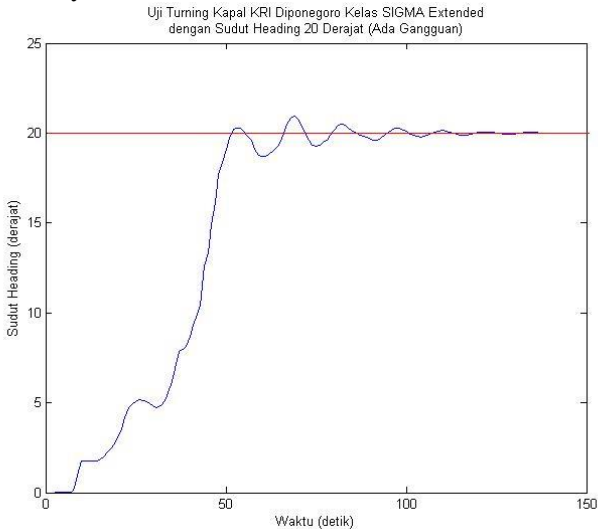
Gambar 4.5 adalah grafik dari respon sistem dari kapal perang Kelas SIGMA *Extended* KRI Diponegoro dengan panjang 106 meter. Respon yang diperoleh berdasarkan hasil *simulink* dapat dikatakan baik, karena sistem sudah sesuai dengan standar.



Gambar 4. 5 Uji Turning dengan Sudut Heading 20° (Tanpa Gangguan)

Gambar 4.5 menunjukkan respon kapal perang Kelas SIGMA *Extended* KRI Diponegoro yang telah diberi nilai *gain* pengendali. Respon yang digambarkan pada Gambar 4.5 menunjukkan nilai *rise time* sebesar 44 detik, *settling time* sebesar 136 detik, *maximum overshoot* sebesar 21,04646°, *error steady state* sebesar 0,34477 %. Respon yang didapatkan menjelaskan bahwa hasil respon dari

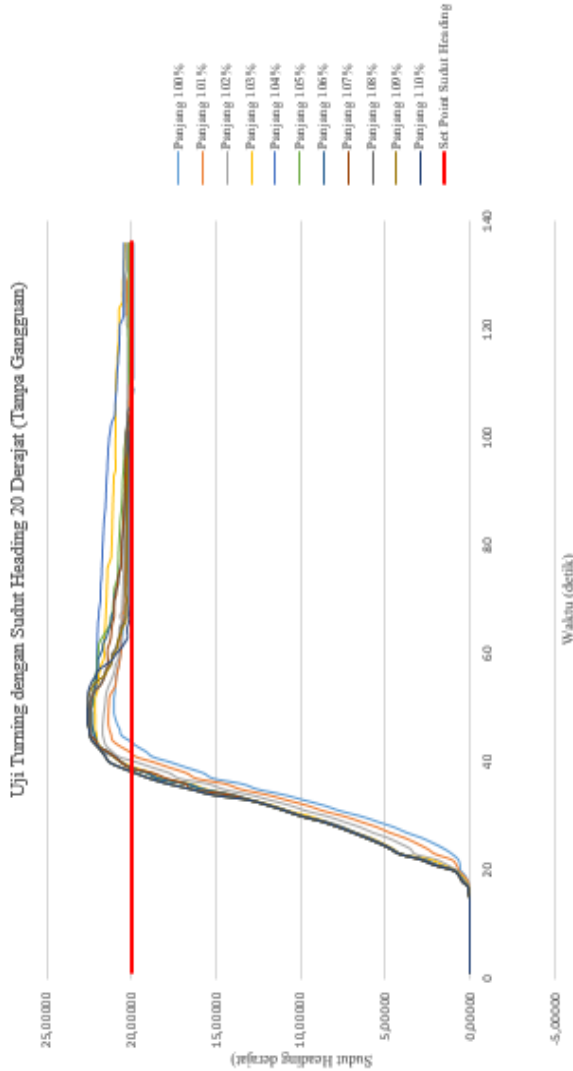
sistem yang dipasang *gain* pengendali dengan *set point heading* sebesar 20° memenuhi syarat sistem stabil yaitu tidak melebihi standar IMO yaitu 25° .



Gambar 4. 6 Uji *Turning* dengan Sudut *Heading* 20° (Ada Gangguan)

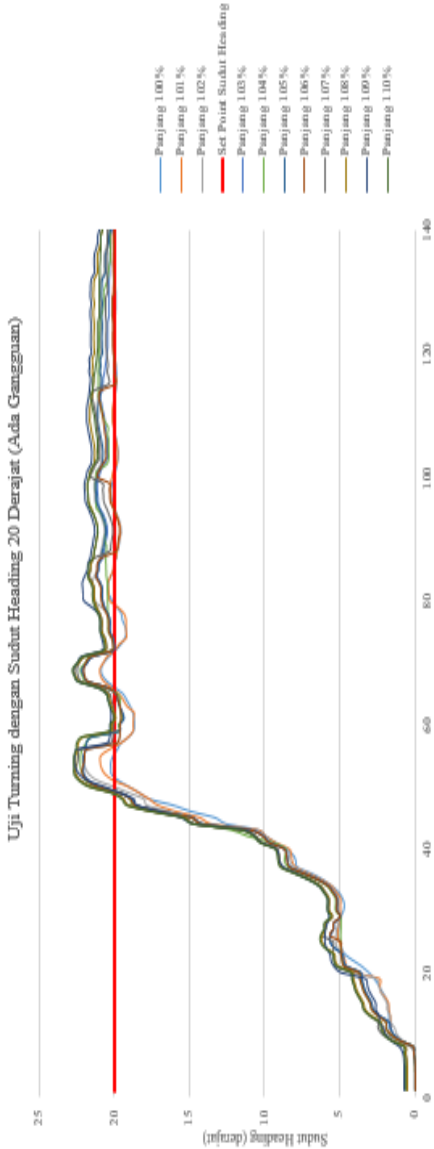
Gambar 4.6 menunjukkan respon kapal perang Kelas SIGMA *Extended* KRI Diponegoro yang telah diberi nilai *gain* pengendali. Respon yang digambarkan pada Gambar 4.6 menunjukkan nilai *rise time* sebesar 52 detik, *settling time* sebesar 132 detik, *maximum overshoot* sebesar $20,92211^\circ$, *error steady state* sebesar 0,3151%. Respon yang didapatkan menjelaskan bahwa hasil respon dari sistem yang dipasang *gain* pengendali dengan *set point heading* sebesar 20° memenuhi syarat sistem stabil yaitu tidak melebihi standar IMO yaitu 25° .

Gambar 4.7 merupakan grafik uji *turning* untuk setiap perpanjangan panjang tanpa adanya gangguan, sedangkan Gambar 4.8 merupakan grafik uji *turning* untuk setiap perpanjangan dengan gangguan. Hasil uji *turning* menjelaskan bahwa semakin bertambah panjang maka respon dari sistem kendali kurang baik.



Gambar 4. 7 *Uji Turning* Panjang 100% sampai Panjang 110% dengan Sudut Heading 20° (Tanpa Gangguan)

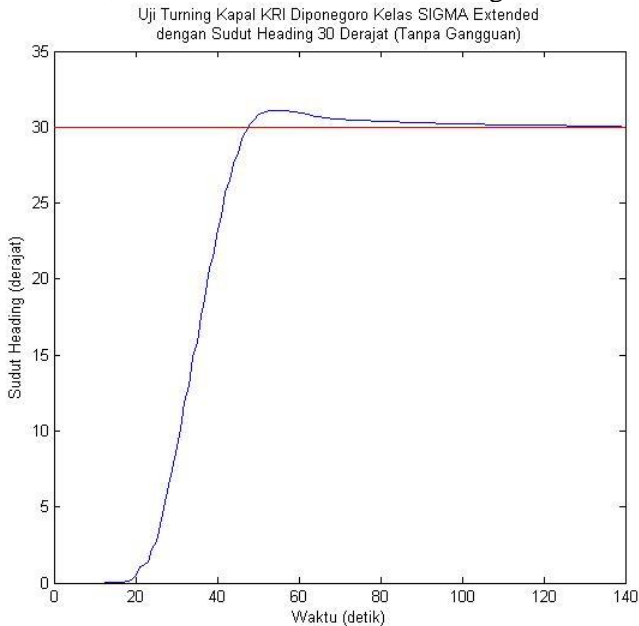
Halaman ini sengaja dikosongkan



Gambar 4. 8 Uji *Turning* Panjang 100% sampai Panjang 110% dengan Sudut *Heading* 20° (Ada Gangguan)

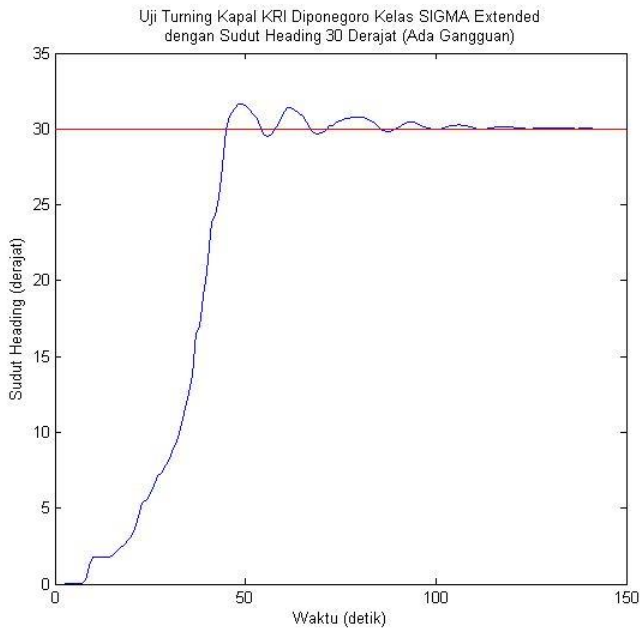
Halaman ini sengaja dikosongkan

Gambar 4.9 adalah grafik dari respon sistem dari kapal perang Kelas SIGMA *Extended* KRI Diponegoro dengan panjang 106 meter. Respon yang diperoleh berdasarkan hasil *simulink* dapat dikatakan baik, karena sistem sudah sesuai dengan standar.



Gambar 4. 9 Uji *Turning* dengan Sudut *Heading* 30° (Tanpa Gangguan)

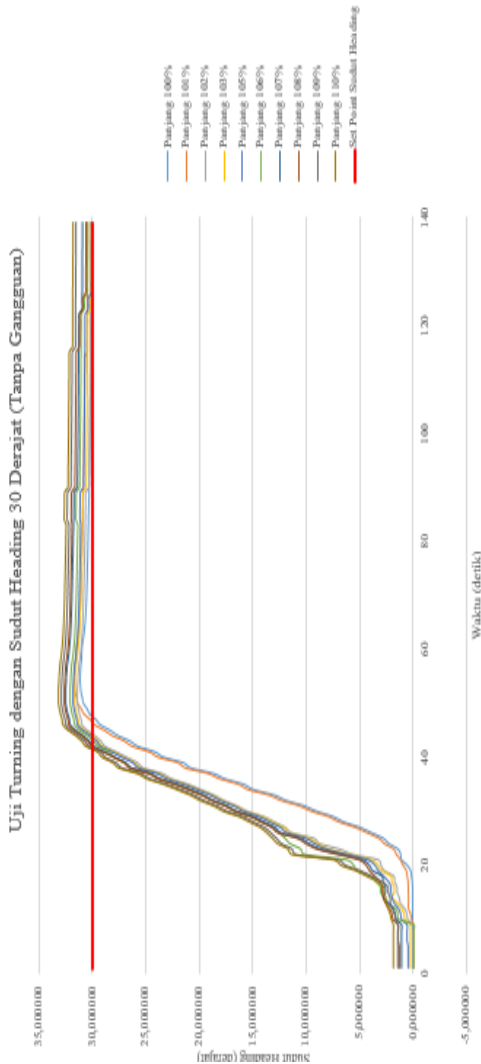
Gambar 4.9 terlihat respon kapal perang Kelas SIGMA *Extended* KRI Diponegoro yang telah diberi nilai *gain* pengendali. Respon yang digambarkan pada Gambar 4.9 menunjukkan nilai *rise time* sebesar 48 detik, *settling time* sebesar 139 detik, *maximum overshoot* sebesar 31,118645°, *error steady state* sebesar 0,366878%. Respon yang didapatkan menjelaskan bahwa hasil respon dari sistem yang dipasang *gain* pengendali dengan *set point heading* sebesar 30° memenuhi syarat sistem stabil yaitu tidak melebihi standar IMO yaitu 40°.



Gambar 4. 10 Uji *Turning* dengan Sudut *Heading* 30° (Ada Gangguan)

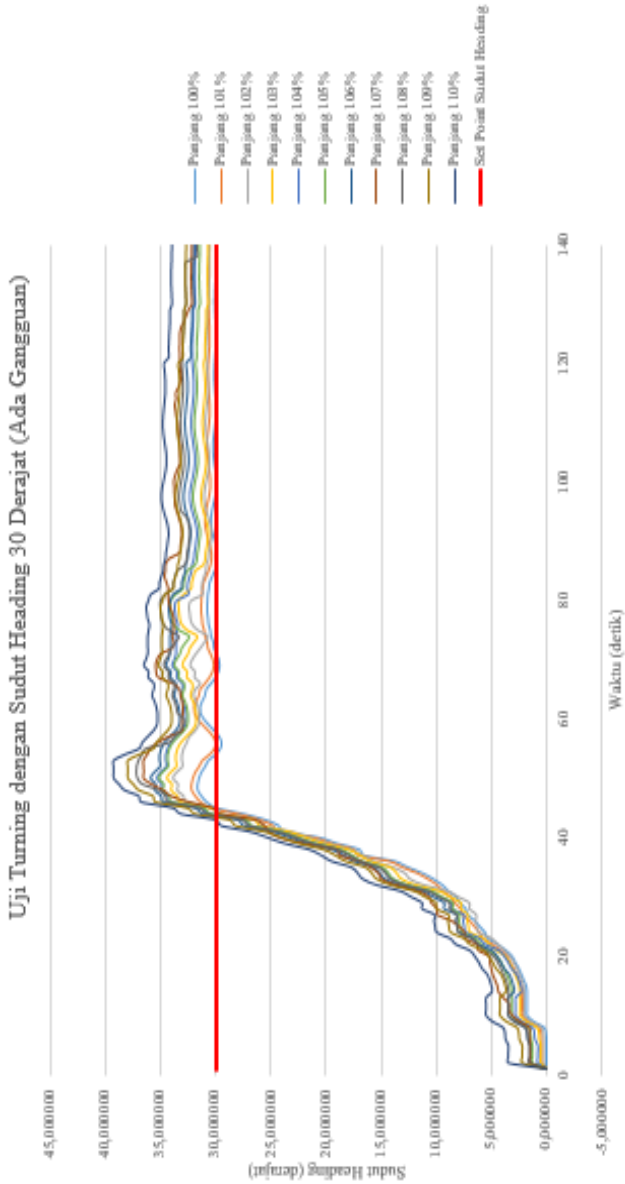
Gambar 4.10 terlihat respon kapal perang Kelas SIGMA *Extended* KRI Diponegoro yang telah diberi nilai *gain* pengendali. Respon yang digambarkan pada Gambar 4.10 menunjukkan nilai *rise time* sebesar 46 detik, *settling time* sebesar 113 detik, *maximum overshoot* sebesar 21,04646°, *error steady state* sebesar 0,301888%. Respon yang didapatkan menjelaskan bahwa hasil respon dari sistem yang dipasang *gain* pengendali dengan *set point heading* sebesar 30° memenuhi syarat sistem stabil yaitu tidak melebihi standar IMO yaitu 40°.

Gambar 4.11 merupakan grafik uji *turning* untuk setiap perpanjangan panjang tanpa adanya gangguan, sedangkan Gambar 4.12 merupakan grafik uji *turning* untuk setiap perpanjangan dengan gangguan. Hasil uji *turning* menjelaskan bahwa semakin bertambah panjang maka respon dari sistem kendali kurang baik.



Gambar 4. 11 Uji Turning Panjang 100% sampai Panjang 110% dengan Sudut Heading 30° (Tanpa Gangguan)

Halaman ini sengaja dikosongkan

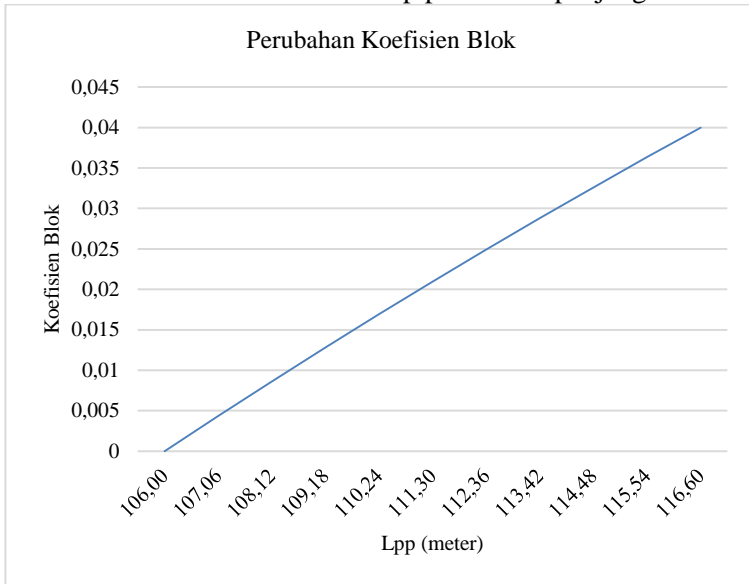


Gambar 4. 12 Uji *Turning* Panjang 100% sampai Panjang 110% dengan Sudut Heading 30° (Ada Gangguan)

Halaman ini sengaja dikosongkan

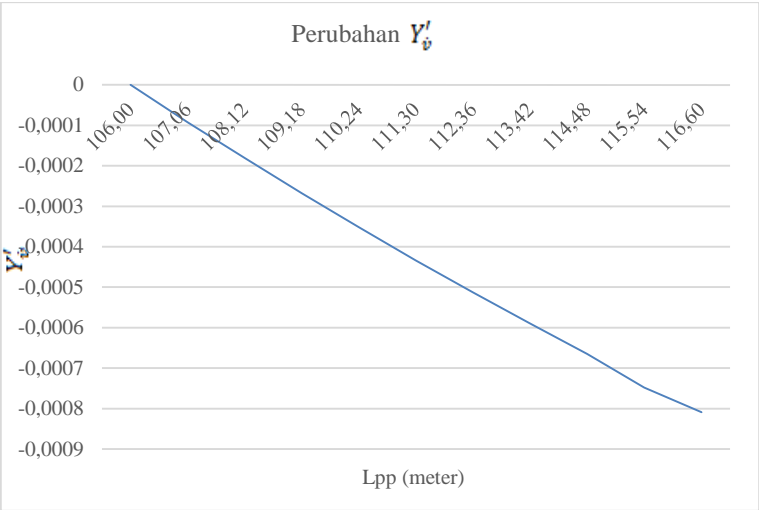
4.5 Analisis Perubahan Koefisien Hidrodinamika Kapal Akibat Perubahan Dimensi Panjang Kapal (L_{pp})

Nilai koefisien hidrodinamika yang berbeda-beda mempengaruhi selisih pada setiap koefisien hidrodinamika. Selisih koefisien hidrodinamika menunjukkan tingkat sensitivitas untuk setiap koefisien hidrodinamika. Gambar 4.13 adalah grafik perubahan koefisien blok dari setiap perubahan panjang.

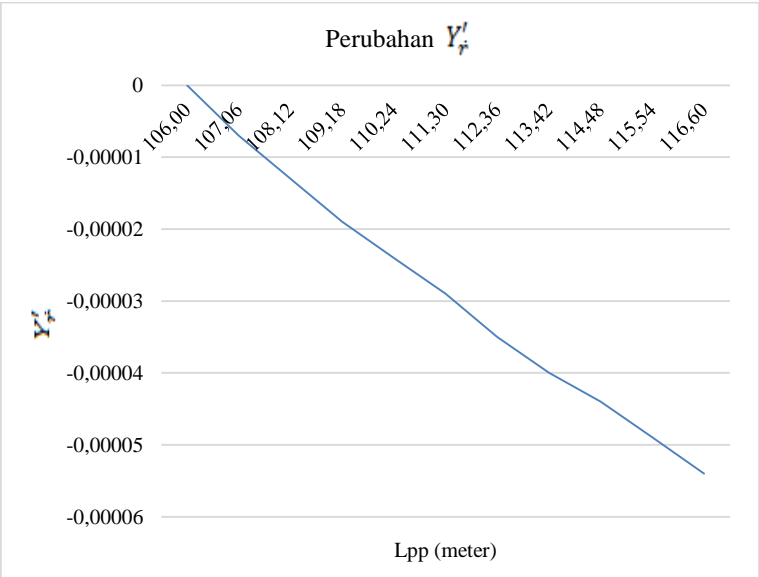


Gambar 4. 13 Grafik Perubahan Koefisien Blok

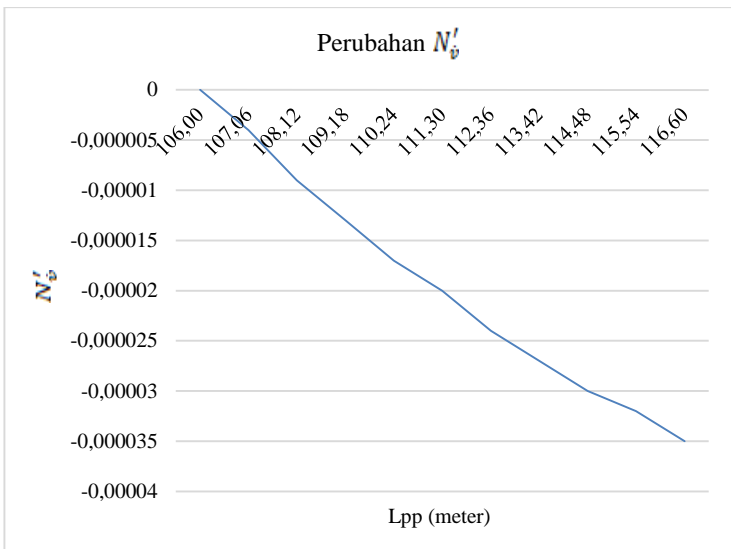
Gambar 4.13 sampai dengan Gambar 4.25 merupakan grafik perubahan koefisien hidrodinamika. Grafik perubahan koefisien hidrodinamika menunjukkan hasil selisih perubahan koefisien hidrodinamika. Hasil grafik ada yang menunjukkan selisih naik dan selisih turun. Hal tersebut menjelaskan bahwa penambahan dimensi panjang kapal mempunyai dampak kurang baik terhadap sensitivitas sistem kendali kapal.



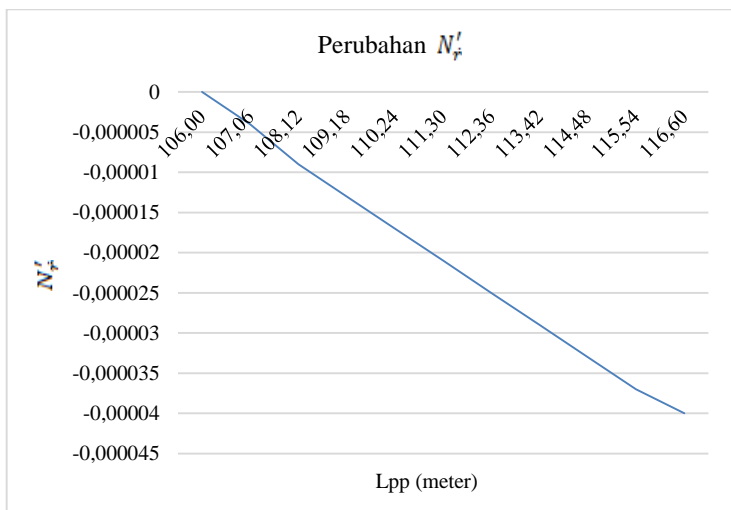
Gambar 4. 14 Grafik Perubahan Y'_v



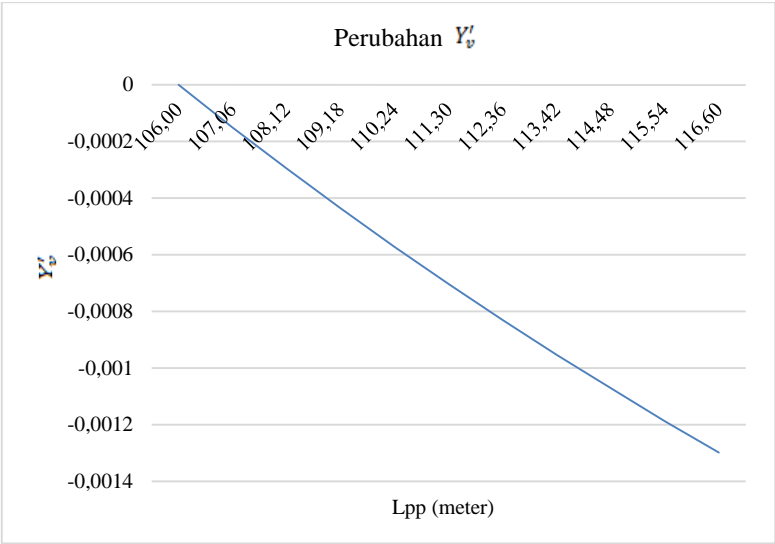
Gambar 4. 15 Grafik Perubahan Y'_r



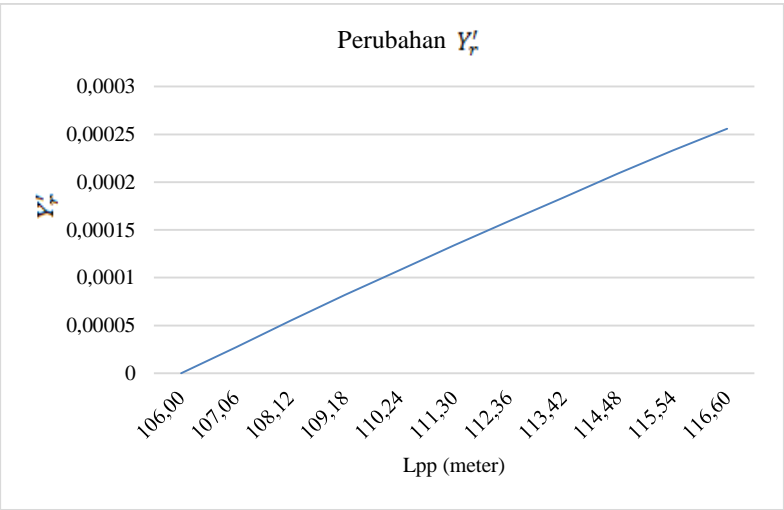
Gambar 4. 16 Grafik Perubahan N'_ψ



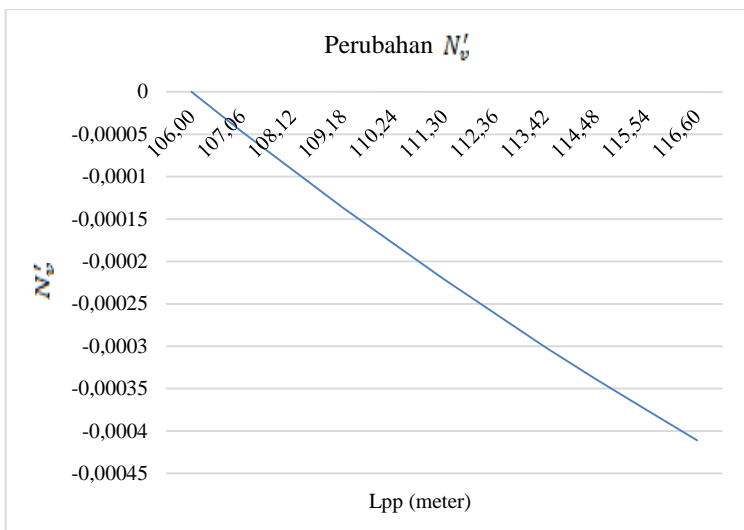
Gambar 4. 17 Grafik Perubahan N'_τ



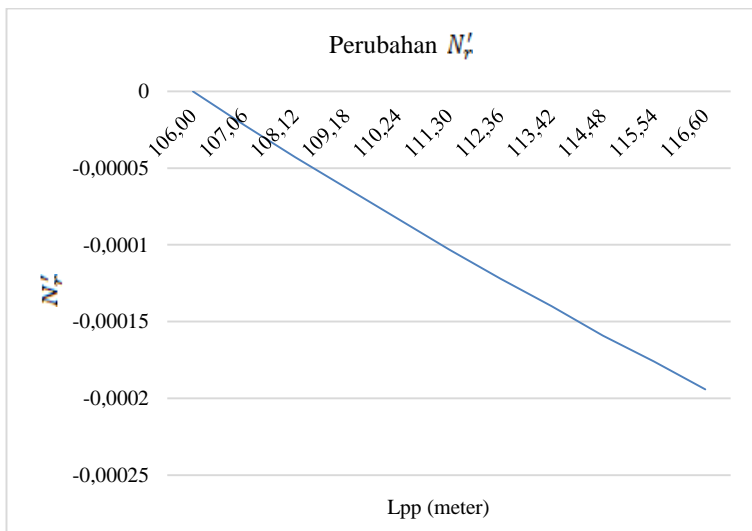
Gambar 4. 18 Grafik Perubahan Y_v'



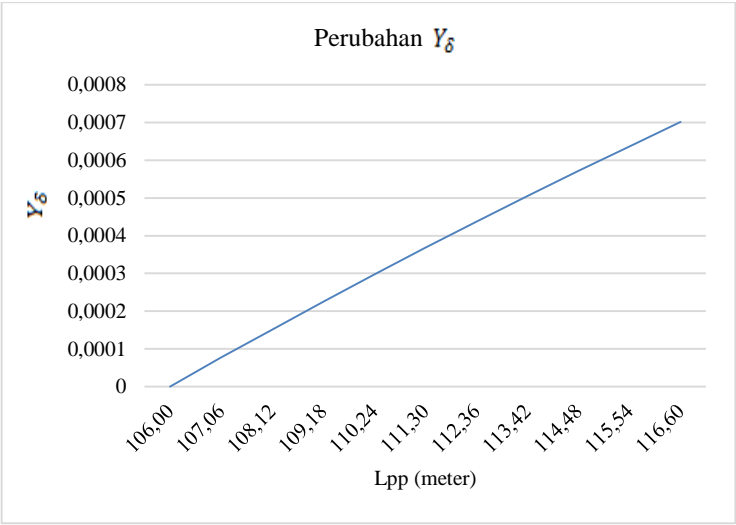
Gambar 4. 19 Grafik Perubahan Y_r'



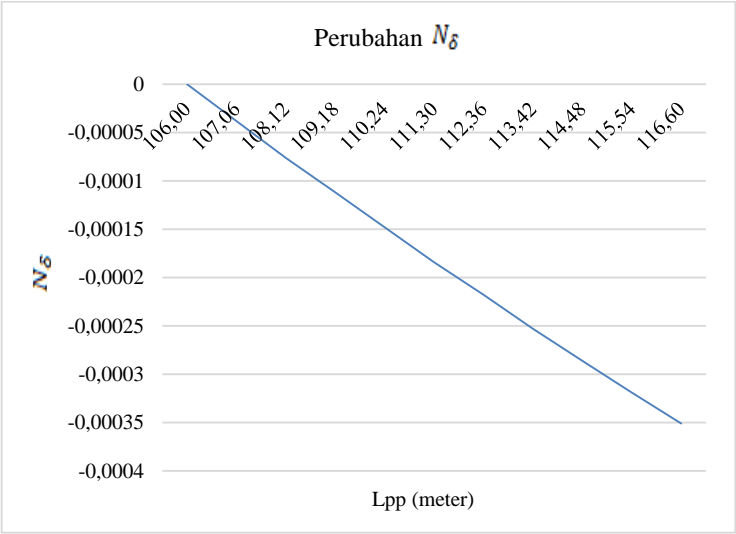
Gambar 4. 20 Grafik Perubahan N'_v



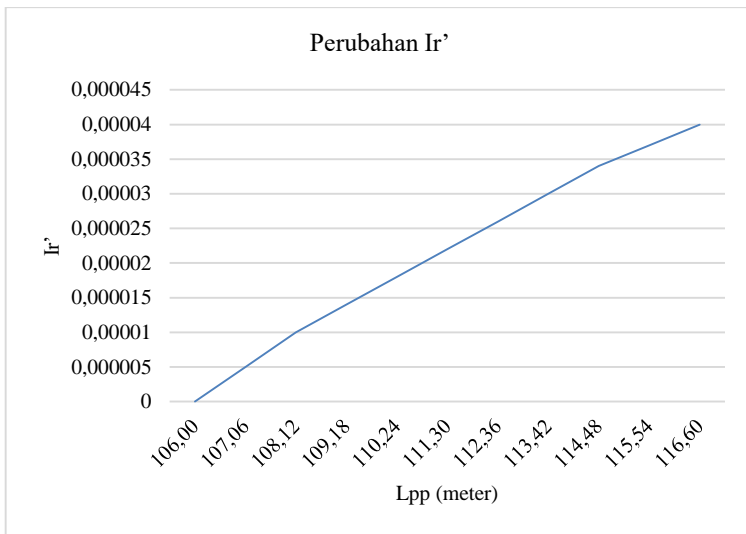
Gambar 4. 21 Grafik Perubahan N'_r



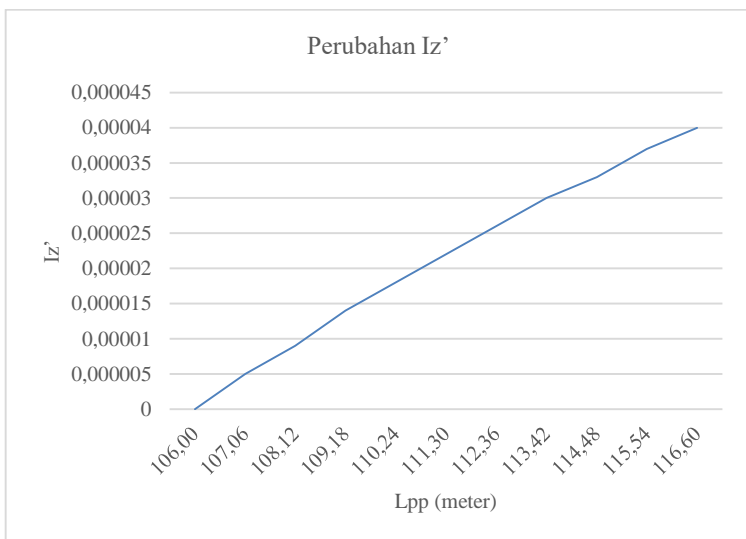
Gambar 4. 22 Grafik Perubahan Y_{δ}



Gambar 4. 23 Grafik Perubahan N_{δ}



Gambar 4. 24 Grafik Perubahan I_r'



Gambar 4. 25 Grafik Perubahan I_z'

4.6 Analisis ΔG Terhadap Nilai Kp, Ki, dan Kd

Perubahan nilai ΔG dipengaruhi oleh perubahan koefisien hidrodinamika. Perubahan nilai ΔG yang didapatkan dari selisih fungsi transfer untuk setiap panjang kapal. Nilai ΔG tersebut akan berpengaruh terhadap nilai Kp, Ki, dan Kd. Nilai ΔG berubah maka nilai Kp, Ki, dan Kd juga akan berubah. Besar nilai Kp, Ki, dan Kd diperoleh dari hasil *tunning*. Hasil *tunning* merupakan hasil nilai Kp, Ki, dan Kd yang terbaik. Hasil *tunning* menggunakan masukan *input* sudut *heading* sebesar 20° dan sudut *heading* 30° karena sesuai standar IMO sudut *heading* yang digunakan adalah 20° dan 30° .

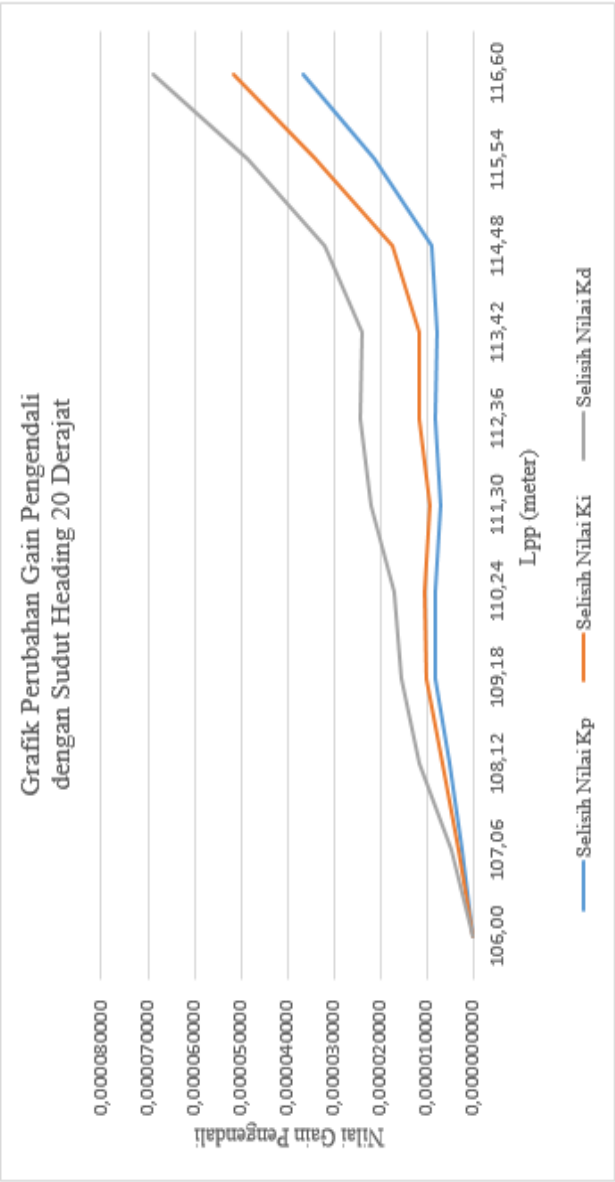
Hasil perancangan pengendalian PID untuk *set point heading* 20° didapatkan rentang nilai Kp, Ki, dan Kd yaitu 0,000274970 – 0,000238380; 0,000082597 – 0,000067669; 0,000402230 – 0,000384870. Nilai Kp, Ki, dan Kd dengan *set point heading* 30° diperoleh rentang nilai Kp, Ki, dan Kd yaitu 0,00027505 – 0,00020104; 0,00008276 – 0,00003844; 0,00045293 – 0,004014. Hasil *tunning* nilai Kp, Ki, dan Kd dengan sudut *heading* 20° dan 30° ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.4, sedangkan selisih nilai Kp, Ki, dan Kd dengan sudut *heading* 20° dan 30° ditunjukkan pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.5. Grafik perubahan nilai Kp, Ki, dan Kd ditunjukkan pada Gambar 4.26 untuk masukan sudut *heading* 20° dan Gambar 4.27 untuk masukan sudut *heading* 30° . Gambar 4.26 dan Gambar 4.27 menunjukkan bahwa hasil perubahan nilai Kp, Ki, dan Kd semakin bertambah panjang kapalnya semakin besar selisihnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa sensitivitas sistem kendali kurang baik.

Tabel 4. 2 Nilai Kp, Ki, dan Kd dengan Sudut *Heading* 20°

Panjang Kapal (meter)	Kp	Ki	Kd
106,00	0,000274970	0,000082597	0,000402230
107,06	0,000272610	0,000081813	0,000400460
108,12	0,000270000	0,000080830	0,000397240
109,18	0,000266590	0,000080860	0,000396870
110,24	0,000266650	0,000080569	0,000395680
111,30	0,000267760	0,000080477	0,000389540
112,36	0,000266700	0,000079373	0,000389500
113,42	0,000267200	0,000078848	0,000389820
114,48	0,000265820	0,000074421	0,000387700
115,54	0,000253760	0,000069680	0,000388000
116,60	0,000238380	0,000067669	0,000384870

Tabel 4. 3 Selisih Nilai Kp, Ki, dan Kd dengan Sudut *Heading* 20°

Panjang Kapal (meter)	ΔKp	ΔKi	ΔKd
106,00	0,000000000	0,000000000	0,000000000
107,06	0,000002360	0,000000784	0,000001770
108,12	0,000004970	0,000001767	0,000004990
109,18	0,000008380	0,000001737	0,000005360
110,24	0,000008320	0,000002028	0,000006550
111,30	0,000007210	0,000002120	0,000012690
112,36	0,000008270	0,000003224	0,000012730
113,42	0,000007770	0,000003749	0,000012410
114,48	0,000009150	0,000008176	0,000014530
115,54	0,000021210	0,000012917	0,000014230
116,60	0,000036590	0,000014928	0,000017360



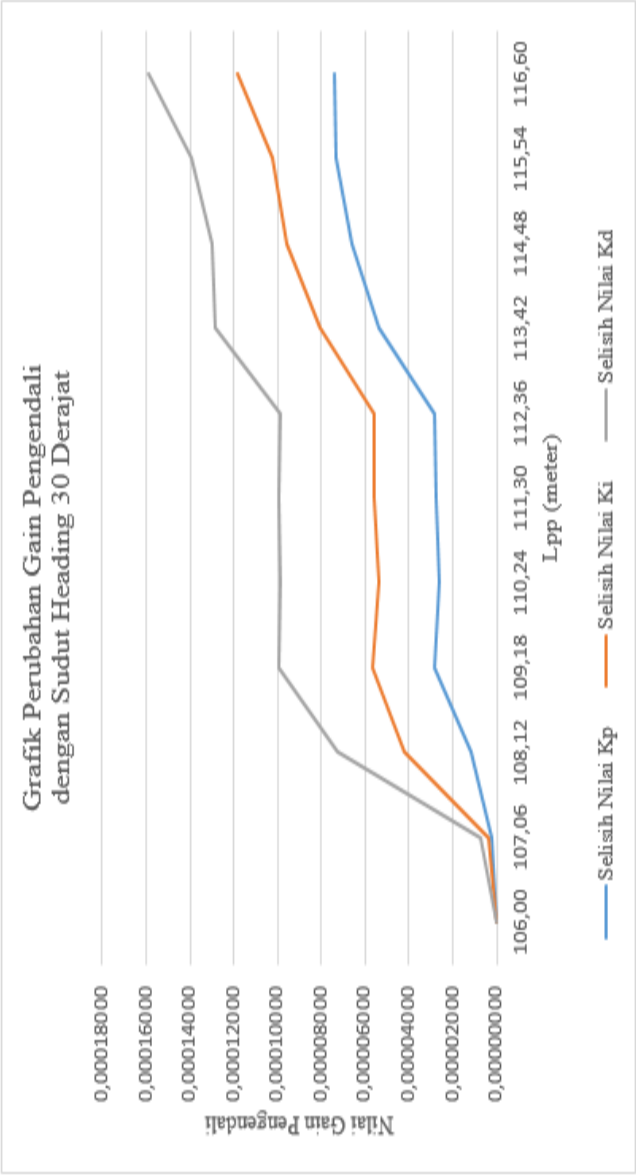
Gambar 4. 26 Perubahan Nilai Kp, Ki, dan Kd dengan Sudut Heading 20°

Tabel 4. 4 Nilai Kp, Ki, dan Kd dengan Sudut *Heading* 30°

Panjang Kapal (meter)	Kp	Ki	Kd
106,00	0,00027505	0,00008276	0,00040549
107,06	0,00027257	0,00008181	0,00040142
108,12	0,00026355	0,00005222	0,00043628
109,18	0,00024642	0,00005498	0,00044838
110,24	0,00024880	0,00005547	0,00045080
111,30	0,00024708	0,00005493	0,00044877
112,36	0,00024681	0,00005475	0,00044831
113,42	0,00022121	0,00005573	0,00045293
114,48	0,00020914	0,00005262	0,00043971
115,54	0,00020208	0,00005325	0,00044271
116,60	0,00020104	0,00003844	0,00044583

Tabel 4. 5 Selisih Nilai Kp, Ki, dan Kd dengan Sudut *Heading* 30°

Panjang Kapal (meter)	ΔKp	ΔKi	ΔKd
106,00	0,00000000	0,00000000	0,00000000
107,06	0,00000248	0,00000096	0,00000407
108,12	0,00001150	0,00003055	0,00003079
109,18	0,00002863	0,00002778	0,00004289
110,24	0,00002625	0,00002729	0,00004531
111,30	0,00002797	0,00002784	0,00004328
112,36	0,00002824	0,00002801	0,00004282
113,42	0,00005384	0,00002703	0,00004744
114,48	0,00006591	0,00003015	0,00003422
115,54	0,00007297	0,00002951	0,00003722
116,60	0,00007401	0,00004432	0,00004034



Gambar 4.27 Perubahan Nilai Kp, Ki, dan Kd dengan Sudut Heading 20°

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari tugas akhir mengenai “Analisis Sensitivitas Sistem Kendali Akibat Perubahan Koefisien Hidrodinamika pada Kapal Perang Kelas SIGMA *Extended*” adalah.

1. Akar-akar fungsi transfer kapal terletak di sebelah kiri sumbu khayal. Hal ini menunjukkan bahwa sistem stabil, namun semakin ditambah panjang kapalnya kestabilan sistem semakin kurang baik. Hasil uji *open loop* 20^o dan *open loop* 30^o memiliki nilai *rise time* berturut-turut adalah 39 detik dan 54 detik. Sistem dapat dengan cepat mencapai *set point* yang ditentukan. Hasil uji indeks stabilitas *yaw* yang bernilai positif. Berdasarkan hasil uji yang telah dilakukan maka sistem stabil. Hasil uji *close loop* nilai *maximum overshoot* dan *error steady state* tidak melebihi dari standar IMO.
2. Panjang kapal dapat diperpanjang dengan rentang perubahan panjang kapal 101% - 110% dari panjang awal kapal yaitu 106 meter.
3. Perubahan nilai koefisien hidrodinamika semakin diperpanjang kapalnya maka diperoleh nilai sensitivitas sistem yang kurang baik, maka semakin ditambah panjang kapal maka performansi sistem kendali kapal dapat dikatakan kurang baik.

5.2 Saran

Adapun saran yang penulis berikan agar sistem pengendalian bisa bekerja dengan lebih baik adalah sebaiknya perancangan pengendalian PID yang dirubah tidak hanya panjang kapal saja tetapi koefisien hidrodinamika lainnya juga ada yang diubah untuk memperoleh respon untuk mengetahui performansi yang lebih

baik, maka perlu diadakannya penelitian berikutnya dengan adanya inovasi baru terhadap perubahan koefisien hidrodinamika tidak hanya panjang kapal saja.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A. M., & Aisjah, S. A. (2016). *Perancangan Sistem Kendali Logika Fuzzy Kapal Perang Kawal Rudal - KRI Diponegoro Kelas SIGMA Untuk Memperoleh Sinyal Kendali Optimal*, Teknik Fisika-FTI-ITS Surabaya.
- Adiawan, N. B. (2016). *Perancangan Autocontrol Tug Boat Berbasis Logika Fuzzy Untuk Sistem Guidance Kapal LNG*. Jurusan Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Adrium, T., & Febriken. (2013). *Permasalahan Indonesia sebagai Negara Kepulauan*, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Aisjah, A. S. (2012). *System autopilot Kapal Perang Kelas SIGMA*, Teknik Fisika-FTI-ITS Surabaya.
- Bertram, V. (2000). *Practical Ship Hydrodynamic*.
- D., G. (2014). *Mengenal 4 Korvet Kelas SIGMA TNI AL*. Retrieved from <http://www.artileri.org/2014/03/4-korvet-kelas-SIGMA-tni-al.html>.
- Firdianda, H. D., Aisjah, A. S., & Masroeri, A. A. (2013). *Perancangan Sistem Kontrol Logika Fuzzy Pada Manuver Nonlinear Kapal Perang Kelas SIGMA (Extended)*.
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and control of ocean vehicles. Automatica (Vol 32)*. Chichester: John Wiley & Sons. [http://doi.org/10.1016/0005-1098\(96\)82331-4](http://doi.org/10.1016/0005-1098(96)82331-4).
- Fossen, T. I. (2002). *a Nonlinear Unified State-Space Model for Ship Manuvering and Control in Seaway International Journal of Bifraction and Chaos, 15(09)*, 2714-2746.
- Handito, R. (2012). *Perancangan Sistem Guidance Untuk Membangun Autopilot Kapal PKR KRI Kelas Sigma*, Teknik Fisika-FTI-ITS Surabaya.
- Hespana, J. P. (2009). *Linear System Theory*.
- Iu zou. (2013). *Numerical prediction of ship-to-ship interaction in shallow water*, Chalmers University of technology, Sweden.
- Lewis, F. L. (1992). *Applied Optimal Control and Estimation*.
- Ogata, K. (2009). *Modern control engineering. IEEE Transactions*

- on Automatic Control (4th ed., Vol. 17). New Jersey: Prentice Hall. <http://doi.org/10.1109/TAC.1972.1100013>.*
- Prananda, J., Aisjah, A. S., & Masroeri, A. A. (2012). *Perancangan Sistem Kendali Cerdas Kapal Perang Kawal Rudal - KRI Diponegoro Kelas SIGMA Untuk Meningkatkan Manuverability Menggunakan Metode Logika Fuzzy*, Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Resolution MSC. (2002). (Vol 137).
- W., G. Y., Aisjah, S. A., & Masroeri, A. A. (2014). *Perancangan Sistem Kontrol OPTIMAL pada Berthing di Dermaga Tanjung Perak Surabaya*, 1-5.

LAMPIRAN

Lampiran A. Pemodelan Dinamika Kapal

Untuk memodelkan sistem dinamika kapal, diperlukan beberapa spesifikasi kapal. Berikut ini adalah beberapa spesifikasi dimensi dan koefisien hidrodinamika kapal KRI Diponegoro Kelas SIGMA *Extended* yang berpengaruh terhadap perhitungan fungsi transfer dinamika kapal.

**Tabel Spesifikasi Kapal Perang Kelas SIGMA KRI
Diponegoro *Extended***

Besaran		Satuan	
Lpp	Panjang	106 m	106 m
U	Kecepatan	27.9 knot	14.4 m/s
B	Lebar	14 m	14 m
T	Sarat	3.7 m	3.7 m
C _B	Koefisien blok	0.44	0.44
XG	Spesifik gravitasi	2.22	2.22
A _δ	Luasan <i>rudder</i>	3.856 m ²	3.856 m ²
m	<i>Displacement</i>	2423 ton	2423000 kg
R	Jari-jari girasi	21.1 m	21.2 m
m'	Massa non dimensional	0,0040126	0,0040126
XG'	Spesifikasi gravitasi non dimensional	0	0

Pemodelan dilakukan berdasarkan model matematik yang diturunkan oleh Nomoto 1957.

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.4 \frac{C_B B}{T}$$

$$\begin{aligned}\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} &= 1.1\left(\frac{B}{L}\right) - 0.041\left(\frac{B}{T}\right) \\ \frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} &= 1 + 0.16\frac{C_B B}{T} - 5.1\left(\frac{B}{L}\right)^2 \\ \frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} &= \frac{1}{2} + 2.4\left(\frac{T}{L}\right) \\ \frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} &= 0.67\left(\frac{B}{L}\right) - 0.0033\left(\frac{B}{T}\right)^2 \\ \frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} &= \frac{1}{12} + 0.17\frac{C_B B}{T} - 0.33\left(\frac{B}{L}\right) \\ \frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} &= -\frac{1}{2} + 2.2\left(\frac{B}{L}\right) - 0.08\left(\frac{B}{T}\right) \\ \frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} &= \frac{1}{4} + 0.039\frac{B}{T} - 0.56\left(\frac{B}{L}\right)\end{aligned}$$

Berikut ini adalah tahapan perhitungan fungsi transfer dinamika kapal barang:

1. Tahap Pertama

Pada tahap ini akan dilakukan perhitungan koefisien hidrodinamika yang selanjutnya akan digunakan untuk menghitung fungsi transfer dinamika kapal. Berdasarkan persamaan di atas, diperoleh nilai:

- Sebelum Dinormalisasi

$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2}$	-1,177414334
$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2}$	-0,041244401
$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2}$	0,009852116
$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2}$	-0,06805113

$\frac{-Y'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2}$	-1,665945946
$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2}$	0,512136665
$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2}$	-0,583773585
$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2}$	-0,323605303
Y'_{δ}	0,007717899
N'_{δ}	-0,00385895
I_r	1088993120
I_z	1100934633

- Setelah Dinormalisasi

$Y'_{\dot{v}}$	-0,004504542
$Y'_{\dot{r}}$	-0,000157793
$N'_{\dot{v}}$	0,00003769
$N'_{\dot{r}}$	-0,000260349
$Y'_{\ddot{v}}$	-0,006373563
Y'_r	0,001959328
N'_v	-0,002233396
N'_r	-0,001238047
Y'_{δ}	0,007717899
N'_{δ}	-0,00385895
I_r'	0,000160505
I_z'	0,000162265

- Dibentuk menjadi matrik sebagai berikut:

M'=	m'-Yv'dot	m'XG'-Yr'dot
	m'XG'-Nv'dot	Iz'-Nr'dot

	0.008517161	0.000157793
	-3.76921E-05	0.000422614

N'=	-Yv'	m'u'-Yr'
	-Nv'	m'XG'u'-Nr'
	0.006373563	-0.001959328
	0.002233396	0.001238047

M=	m'11 x L/U^2	m'12 x L^2/U^2
	m'21 x L/U^2	m'22 x L^2/U^2
	0.004382441	0.00860624
	-1,93942E-5	0.023050017

N=	n'11/U	n'12 x L/U
	n'21/U	n'22 x L/U
	0.000444058	-0.014470075
	0.000155605	0.00914349

2. Tahap Kedua

Tahap ini adalah mencari fungsi transfer kapal barang berdasar pada pehitungan di atas.

$$\frac{\psi}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1 + T_3s)}{s(1 + T_1s)(1 + T_2s)}$$

$$T_1T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)}$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det(N)}$$

$$K_R = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)}$$

$$K_R T_3 = \frac{m_{21} b_1 - m_{11} b_2}{\det(N)}$$

Sehingga diperoleh fungsi transfer dinamika kapal barang sebagai berikut:

$$\begin{array}{ll} \det(M) & 0,000101 \\ \det(N) & 0,00000631 \end{array}$$

T1T2	T1 + T2	Kr	KrT3
16,03077367	7,713468264	0,461764398	2,655671338

$$\frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} = \frac{2,655671338 + 0,461764398 s}{16,03077367 s^3 + 7,713468264 s^2 + s}$$

BIODATA PENULIS



Nama Penulis Desty Ajeng Pawestri dilahirkan di Kabupaten Trenggalek, tanggal 21 Desember 1994 dari ayah yang bernama Sariyanto dan Ibu bernama Sri Karyati. Saat ini penulis tinggal di Desa Ngetal, RT 23/ RW 08, Kecamatan Pogalan, Kabupaten Trenggalek, Provinsi Jawa Timur. Pada tahun 2007 penulis telah menyelesaikan pendidikannya di SDN 1 Ngetal. Kemudian pada tahun 2010 telah menyelesaikan pendidikan tingkat menengah pertama di SMPN 1 Trenggalek. Tahun 2013 berhasil menyelesaikan pendidikan menengah atas di SMAN 1 Trenggalek. Pada bulan Januari 2017 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul ***ANALISIS SENSITIVITAS SISTEM KENDALI KAPAL AKIBAT PERUBAHAN KOEFISIEN HIDRODINAMIKA PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA EXTENDED***. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui *email* destyajengpawestri@gmail.com.

